

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
В.о. завідувача кафедри
_____ Володимир ЄРЕМЕНКО
« ____ » _____ 2020 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології екологічної безпеки»**

зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

**на тему: «Моделювання фотоелектричних сонячних батарей на основі
еквівалентних схем»**

Виконав студент II курсу, групи ПН-391мп
Загоржевський Владислав Ігорович _____

Керівник:
Доцент, к.т.н.
Божко Костянтин Михайлович _____

Консультант з «Розробка стартап проекту»:
Доцент д.е.н.,
Бояринова Катерина Олександрівна _____

Консультант із нормоконтролю:
Доцент к.т.н.,
Божко Костянтин Михайлович _____

Рецензент:
асистент,
Момот Андрій Сергійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма Інформаційні вимірювальні технології екологічної безпеки

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Загоржевському Владиславу Ігоровичу

1. Тема дисертації «Моделювання фотоелектричних сонячних батарей на основі еквівалентних схем», науковий керівник дисертації Божко Костянтин Михайлович, к.т.н. доцент, затверджені наказом по університету від «__» _____ 2020 р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації “3” грудня 2020 р

3. Об’єкт дослідження Об’єктом дослідження є процес вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей

4. Вихідними даними є еквівалентні схеми фотоелектричної батареї

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

5.1. Провести аналіз сучасних технологій виготовлення фотоелектричних сонячних батарей та вимірювання їх експлуатаційних параметрів

5.2. Розробити екві-валентну схему фотоелектричної сонячної батареї при наявності в ньому прихованих дефектів

5.3. Виконати моделювання двокаскадної схеми лінійної розгортки струму засобами MultisimEWB13

5.4. Виконати експерименти з вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних елементів та батарей без дефектів і за наявності дефектів.

5.5. Виконати розрахунок та аналіз похибок вимірювання вольт-амперної характеристики сонячної батареї.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Будова схемастенду для мірювання вольт-амперної параметри сонячної батареї. Вдосконалена еквівалентна схема фотоелектричної сонячної батареї із прихованим дефектом.

7. Орієнтовний перелік публікацій. Підготувати 2 доповіді на конференції із публікацією тез Вдосконалення еквівалентних схем фотоелектричних сонячних батарей, темнова вольт-фарадна характеристика сонячної батареї.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1. ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТУ	Доцент, к.т.н. Божко Костянтин Михайлович	10.11.2020	10.11.2020
Розділ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ	Доцент, к.т.н. Божко Костянтин Михайлович	28.11.2020	28.11.2020
Розділ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ	Доцент, к.т.н. Божко Костянтин Михайлович	15.11.2020	15.11.2020
Розділ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ	Доцент, к.т.н. Божко Костянтин Михайлович	10.11.2020	10.11.2020

Розділ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	Бояринова К. О. доцент, д.е.н.,	10.11.2020	10.11.2020
------------------------------------	---------------------------------------	------------	------------

9. Дата видачі завдання 10 вересня 2020 року _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примі тка
1	написання Розділу 1. огляд математичної моделі сонячного елемента	28.11.2020	
2	написання Розділу 2. вдосконалення методів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей	28.11.2020	
3	написання Розділу 3. вдосконалення засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей	28.11.2020	
4	написання Розділу 4. експериментальне дослідження вдосконалених методів і засобів контролю дефектів	28.11.2020	
5	Розробка стартап проекту	28.11.2020	

Студент

Влидислав ЗАГОРЖЕВСЬКИЙ

Науковий керівник

Костянтин БОЖКО

Анотація

Магістерська дисертація «Моделювання фотоелектричних сонячних батарей на основі еквівалентних схем» за об'ємом складає 112 сторінки, містить 18 таблиці, 48 ілюстрації, використано 160 інформаційних джерел.

Об'єктом дослідження є моделювання фотоелектричних сонячних елементів і батарей

Предметом дослідження є метод еквівалентних схем фотоелектричних сонячних батарей.

Проведено аналіз існуючих методів вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних батарей та порівняння їх з методом динамічного вимірювання ВАХ ФЕСБ.

Побудовано математичну модель методу лінійного розгорнення струму у часі та обґрунтовано вибір транзистора і генератора прямокутних імпульсів для даної схеми.

Вдосконалено моделі сонячних елементів і батарей за рахунок застосування еквівалентної схеми, в якій враховано наявність прихованих дефектів у ФЕСБ.

Розроблено вдосконалену еквівалентну схему сонячного елемента за наявності прихованих дефектів.

Вдосконалено схему лінійного розгорнення струму - за допомогою паралельного (каскадного) підключення транзисторів MOSFET. Це забезпечило вимірювання ВАХ потужних ФЕСБ та їх масивів.

Побудовано фізико-математичну модель двокаскадної схеми, яка описує процеси які відбуваються в схемі під час вимірювання.

Проведено експерименти із зняття вольт-амперних характеристик сонячних батарей за допомогою динамічного методу вимірювання.

Проведено аналіз отриманих осцилограм їх та визначення експлуатаційних параметрів сонячних батарей.

Розраховано похибки вимірювання ВАХ.

За результатами дослідження розроблено стартап-проект.

The master's work “Modeling of photovoltaic solar cells based on equivalent circuits” in volume is 112 pages, contains 18 tables, 48 illustrations, 160 information sources were used.

The object of study is the simulation of photovoltaic solar cells and batteries

The subject of research is the method of equivalent circuits of photovoltaic solar cells.

The analysis of the existing methods of measuring the current-voltage characteristics of solar cells and comparing them with the method of dynamic measurement of the FESB voltages is carried out.

The mathematical model of the method of linear current propagation in time is constructed and the choice of transistor and rectangular pulse generator for this scheme is substantiated.

Models of solar cells and batteries have been improved by applying an equivalent scheme, which takes into account the presence of hidden defects in the FESB.

An advanced equivalent solar cell scheme was developed in the presence of hidden defects.

Improved circuitry for linear current deployment - using parallel (cascaded) MOSFET transistors. This ensured the measurement of the CVCs of the powerful FESBs and their arrays.

A physical-mathematical model of a two-stage scheme is constructed, which describes the processes that occur in the scheme during measurement.

Experiments were performed to remove the current-voltage characteristics of solar cells using a dynamic method of measurement.

Перелік публікацій

Загоржевський В.І. Вдосконалення еквівалентних схем фотоелектричних сонячних батарей /В.І. Загоржевський, К.М. Божко, А.А. Чорнуха //Матеріали 43-ої Міжнародної наукової інтернет-конференції "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". – 14 листопада 2019 р. – м. Тернопіль. – с. 54-55.

Божко К.М. Темнова вольт-фарадна характеристика сонячної батареї /К.М. Божко, В.І. Загоржевський, А.А. Чорнуха //Матеріали 44-ої Міжнародної наукової інтернет-конференції "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні а та технічні аспекти становлення". – 12 грудня 2019 р. – м. Тернопіль. – 2с.

ЗМІСТ

ВСТУП	18
Розділ 1. ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТУ	13
1.1 Математична модель сонячного елемента	13
1.1.2. Технології фотоелектричних сонячних елементів і батарей	13
1.1.3 Побудова математичної моделі сонячного елемента	17
1.1.4 Методи вимірювання вольт-амперних характеристик фото- електричних сонячних елементів і батарей	23
1.1.5 Засоби контролю дефектів фотоелектричних сонячних елементів і батарей	29
РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ	34
2.1. Динамічний метод вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей на основі лінійної розгортки струму.	42
2.1.1. Базова R,L- модель динамічного методу вимірювання вольт- амперних характеристик	42
Висновки до другого розділу	45
РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ	46
3.1. Створення засобу динамічного вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей на основі лінійної розгортки струму	49
Висновки до третього розділу	50
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ	51
4.1. Експериментальні результати застосування методів вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних елементів і	

батареї	57
4.1.1. Статичні вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних елементів	57
4.1.2. Вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних елементів	
4.1.3. Вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних елементів	
4.1.4. Розрахунок похибок вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей динамічним методом із лінійною розгорткою струму	65
4.1.5. Оцінювання вірогідності контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей	67
4.1.6. Контроль дефектів фотоелектричних сонячних батарей методом інфрачервоної термографії	70
4.1.7. Розрахунок теплової потужності дефекту фотоелектричної сонячної батареї	71
4.1.8. Телевізійний контроль електролюмінісцентних дефектів фотоелектричних сонячних батарей	74
4.1.9. Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів електролюмінісцентних дефектів	75
Висновки до четвертого розділу	77
Розділ 5 Розробка стартап проекту	78
5.1 Опис ідеї проекту	78
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	80
5.3 Технологічний аудит ідеї проекту	82
5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	84
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	86
Загальні висновки	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	96

ВСТУП

Постійний пошук нових ресурсів енергії сьогодні та в майбутньому є основою життя всіх урядів світу та людства. Найбільшої уваги набирають природні види енергії, що власними силами поновлюються, зокрема, сонячна теплова енергетика, мають потенціал перекрити всі або більшу частину потреб людини в енергетиці. З застосуванням математичного моделювання було змодельовано, що всього 0,16% сонячних панелей, що покривають поверхню землі дозволять забезпечити людству 20 ТВт електроенергії. А такі значення на 50% перевищують потребу людства в енергетиці.

Хочемо зазначити, що процес трансформування сонячної енергії у струм можливий при використанні сонячних елементів. Початок розробки, застосування сонячних панелей розпочалось у середині 20 століття. Тоді були продемонстровані на весь світовий загаль сонячні елементи на основі р - n-переходів, що були виготовлені з монокристалів кремнію, а їх корисна дія дорівнювала всього 5-6%.

Всі виробники сонячних елементів намагаються досягнути максимуму потужності на виході. Для цього сонячні батареї розташовують на південь для того, щоб вони максимальний час були на сонці та могли згенерувати максимум енергії. Звісно щодо розташування обираються країни, рельєфи таким чином щоб кількість сонячних днів та тримання сонця у зеніті було більшим у порівнянні з іншими менш сонячними країнами, а щодо рельєфі, то краще всього обирати пустелі, напівпустелі. Хоча для таких випадків виникає інша проблема, а саме напilenня піску та пилу на поверхні сонячних елементів, що потребує повсякчасного прибирання. У науково-технічній літературі, що присвячено розробкам та засобам генерації енергії з природнього сонячного світла у вигляді струму, що максимум від такої генерації може бути тільки 30%.

Основною роботою у дисертаційному проекті є розробка і аналіз математичної моделі сонячного елементу.

Актуальність теми випливає з необхідності вдосконалення методів і засобів вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних батарей для періодичного контролю їх електричних параметрів під час усього терміну експлуатації.

Метою роботи розробка і застосування вдосконаленої еквівалентної схеми фотоелектричної сонячної батареї із врахуванням її прихованих дефектів.

Задачі дослідження:

1. Виконати аналіз експлуатаційних характеристик фотоелектричних сонячних батарей та методів і засобів їх вимірювання;
2. Розробити вдосконалену еквівалентну схему фотоелектричної сонячної батареї із прихованим ефектом та її математичну модель;
3. Експериментально перевірити вдосконалений динамічний метод вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей.

Предметом дослідження є еквівалентні схеми фотоелектричної сонячної батареї.

Методи дослідження. Для моделювання роботи електронних схем використано пакет Multisim Electronix Workbench, v.13.

Наукова новизна наших результатів представлена у наступних позиціях:

1. Створено вдосконалену еквівалентну схему фотоелектричної сонячної батареї із прихованим дефектом типу «електричний мікро-пробій».
2. Вперше отримано темнову вольт-фарадну характеристику фотоелектричної сонячної батареї методом збудження власних коливань в контурі, який утворює власна ємність сонячної батареї і зовнішня котушка індуктивності. Коливання періодично збуджують коротким замиканням сонячної батареї за допомогою транзисторного ключа.

Практичне значення результатів магістерської дисертації полягає в тому, що:

1. Побудовано математичну модель двокаскадного пристрою лінійної розгортки струму для вимірювача вольт-амперних характеристик сонячних елементів.
2. Отримано нові експериментальні результати про вплив дефектів на вольт-амперні характеристики сонячних елементів і батарей.

РОЗДІЛ 1 Огляд математичної моделі сонячного елементу

На сьогоднішній час екологічний стан водних ресурсів, ґрунтів та повітря потребує рішучого впровадження новітніх технологій, що є лояльними для збереження природи. Тому широкого застосування набуває використання сонячних батарей [1-3, 5]. Такі батареї найчастіше виготовляють з кристалічного кремнію, що становить майже 85 % від загального виготовлення сонячних батарей. [4- 7, 8, 9]. Науковці мають ряд задач щодо підвищення коефіцієнту корисної дії сонячних батарей, адже на сьогодні, він є досить низьким порядку 12-15% та збільшення терміну експлуатації ФЕСБ. Вирішення таких задач дозволить зменшити собівартості енергії [10].

Ми вважаємо, що пріоритетним завданням написання дисертаційної роботи магістра для нас є стимулювання проявів дефектів, що є прихованими, з застосуванням нових методик. Такі новорозроблені методики для раннього діагностування дозволять на початкових (ранніх) етапах руйнації або виникнення дефектів сонячних елементів батарей, приймати рішення, що дозволять зупинити процес руйнації та зберегти максимальний коефіцієнт корисної дії для сонячних елементів фотоелектричних батарей.

Створені на цей час методики та системи для контролю сонячних елементів (СЕ) та фотоелектричних сонячних батарей (ФЕСБ) загалом мають першочерговою задачею їх застосування для побутових користувачів та невеликих підприємств, що не потребують великого обсягу електричної енергії [35]. Проте, експлуатація ФЕСБ, тривалість якої складає від двадцяти та до тридцяти років, не має належного технічного супроводу та контролю за правильною роботою СЕ. Це спонукає до вдосконалення методик і систем аналітичного дослідження щодо власних характеристик сонячних елементів. Адже від показників характеристик сонячних елементів можна розрахувати та визначити якість роботи (генерації світлової сонячної енергії у струм).

Адже при роботі сонячних елементів поступово виникає зниження коефіцієнту корисної дії сонячних елементів батарей.

Визначення вольт-амперних характеристик сонячних елементів дозволяє визначити максимальні показники потужності й коефіцієнту корисної дії сонячних елементів батарей.

Контроль дефектів методом ІЧТ за різницею теплового випромінювання при нагріванні методом зворотнього темного струму використовують при тестуванні ФЕСБ в умовах виробництва [38,39]. Проте, зазначену методику найчастіше застосовують для проведення технічного контролю батарей та їх елементів.

Як відомо у основі всіх сонячних батарей покладено фотоелектричний перетворювач – це є базис при виготовленні сонячних елементів, коротко ФЕП. Він виконує розділення фотонів електричним струмом [42]. Фотоелектричні перетворювачі проектують з закладенням у основу технології р-n перехід.

Характеристики та технічні параметри фотоелектричних перетворювачів, сонячних елементів батарей визначають при конкретному показнику кількості сонячного випромінювання. Вплив атмосфери на енергетичну освітленість від сонячного випромінювання можна трактувати кількістю повітряної маси (AM – Airmass).

Відомо, що типи фотоелектричних пристроїв описуються певною кількістю параметрів та технічних характеристик, що визначають властивості, область використання у різних галузях життєдіяльності або промисловості. З аналітичного дослідження різних літературних та довідникових джерел інформації, можемо зазначити, що головними характеристиками сонячних батарей вважають наступні: інтегральна чутливість, спектральна характеристика [1, 2,43].

Визначення інтегральної чутливості фотоелектричного перетворювача - це кількість фотоструму короткого замкнення $I_{к.з.}$, що створюється під час

падіння на ФЕП одиниці потоку променевої енергії Φ , та може бути представлена у вигляді формули наведеної нижче:

$$i = \frac{I_{\text{к.з.}}}{\Phi} . \quad (1.1)$$

Цей показник вимірюється в наступних одиницях: по-перше, у відношенні ампер до ват, по-друге, у люменах [44].

Зазначення температури джерела випромінювання (2840° K) під час розрахунку інтегральної чутливості є важливим, оскільки, розподіл теплової енергії джерела залежить від температури розжарення, що є очевидним фактом. Хочемо зазначити, що різноманіття типів фотоелектричних елементів різні за чутливістю у спектральному діапазоні випромінювання. [45].

Другою головною характеристикою для фотоелектричного перетворювача прийнято вважати спектральну чутливість про що ми вже зазначали вище по тексту дисертації. Хочемо зауважити, що спектр випромінювання для ФЕП є нерівномірним, тобто перетворювач по різному відкликається на різних довжинах хвиль на випромінювання, що надійшло до елементу сонячної батареї. Спробуємо записати визначення спектральної чутливості. Це чутливість, що визначає кількість фотоструму, який створюється під впливом 1 випромінювання на певній довжині хвилі.

Визначення спектральної чутливості фотоелектричного елементу на різних довжинах хвиль спектрального діапазону не є достатнім. Для цього потрібна спектральна характеристика перетворювача сонячної енергії у струм, яку зазвичай зображають у вигляді графіку $i_{\lambda}=f(\lambda)$. Максимальний показник спектральної чутливості перетворювача з кремнію розташований у межах видимого спектру випромінювання $0,69 - 0,79$ мкм й є близьким до максимуму розподілу кількості фотонів як функції довжини хвилі в сонячному спектрі.

Хочемо зазначити, що при визначенні спектральної характеристики, ми отримуємо ряд оптичних показників, які використовуються при наступних

розрахунках. Наприклад, за розподілом спектральної чутливості перетворювача сонячної енергії у струм визначають кількість струму, який створюється в зовнішньому колі. [43,44].

Під час проведення експериментальних досліджень зазвичай спектральний склад випромінювання приймають сталим, наприклад, 1000 Вт/м^2 [46] Ми так само скористаємося цим показником для майбутніх розробок експериментального устаткування та розрахунків.

Хочемо зазначити, що при проведенні аналітичного дослідження стандартів щодо спектру поглинання випромінювання сонячними елементами, що виготовлені з кремнію, та працюють у діапазоні довжин хвиль від 304 до 1140 нм) було виконано ряд розрахунків, що ми представляємо у таблиці 1.1. Результатом наших розрахунків стало графічне зображення залежності сонячної світимості від довжини хвилі, що представлено на рисунку 1.1 З цього графіку нами отримано показники інтегральної світимості для різних типів сонячних елементів.

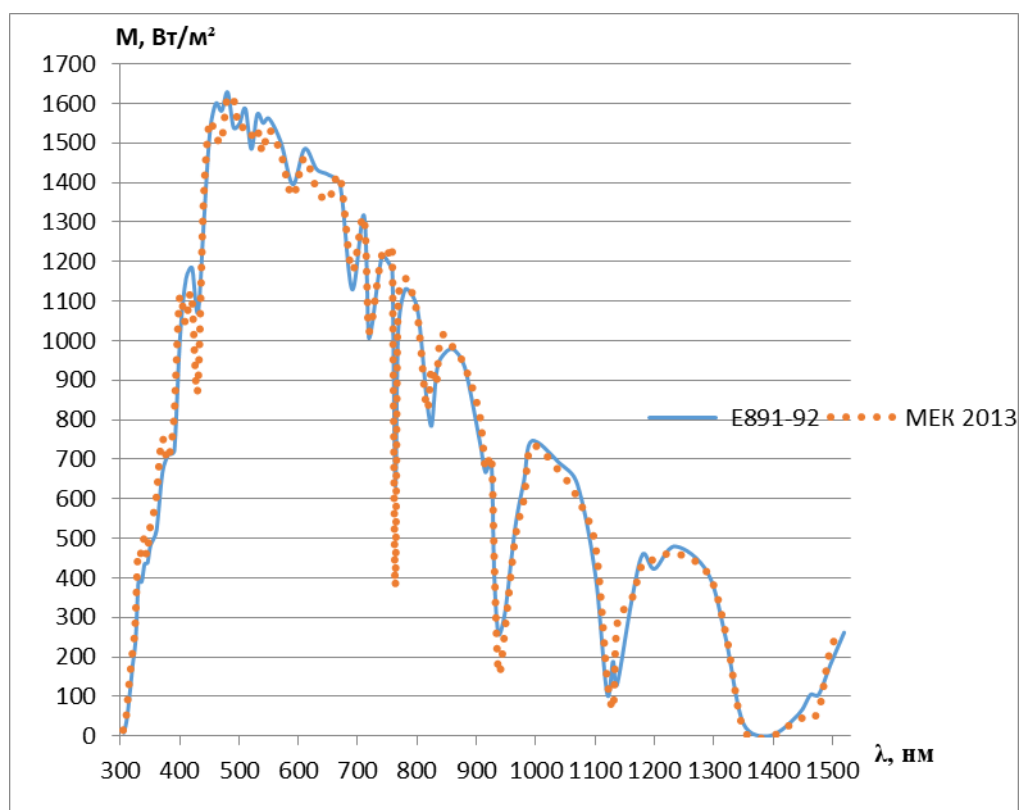


Рисунок 1.1 – Графічна залежність світимості від довжини хвиль

Як відомо, існує декілька типів конструкцій сонячних елементів. По – перше, наведемо конструкцію першого покоління сонячних елементів на рисунку наведеному нижче. Зазначимо, що елементи таких сонячних батарей виготовляють з кристалічного кремнію.

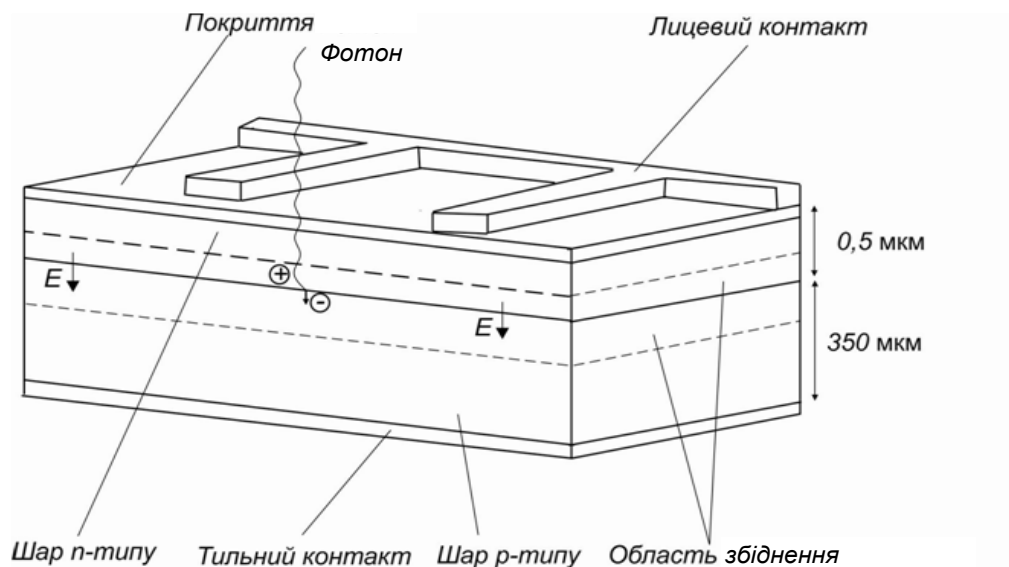


Рисунок. 1.2 – Зовнішній вигляд сонячних елементів батарей

Принцип роботи конструкції першого покоління сонячних елементів полягає у роботі напівпровідників *n*-типу, що містять у своєму складі певну частку домішок атомів іншого типу, що мають властивість при нормальній температурі (21 С) іонізувати. Хочемо зазначити, що у такому напівпровіднику є n_0 певна кількість вільних рівноважних електронів, що дорівнює кількості нерухомих позитивно заряджених іонів.

Стрімка еволюція технологій сонячних елементів прагне одного, а саме значне зростання коефіцієнту корисної дії, проте не за рахунок вартості. Адже дорога енергія, буде результатом роботи таких сонячних елементів. Та жоден не схоче купувати таку дорогу енергія, вона не знайде свого користувача.

Сучасні нові розроблені методи контролю дефектів сонячних елементів розроблено таким чином, що їх можливо пристосувати для контролю майже всіх сонячних батарей. Оскільки, ми також будемо рівнятись на ще таких

показник сонячних батарей, як їх корисний коефіцієнт, тому хочемо навести у якості прикладу відомий графічний аналіз щодо цього коефіцієнту по відношенню до різних технологій виготовлення (рис.1.3).

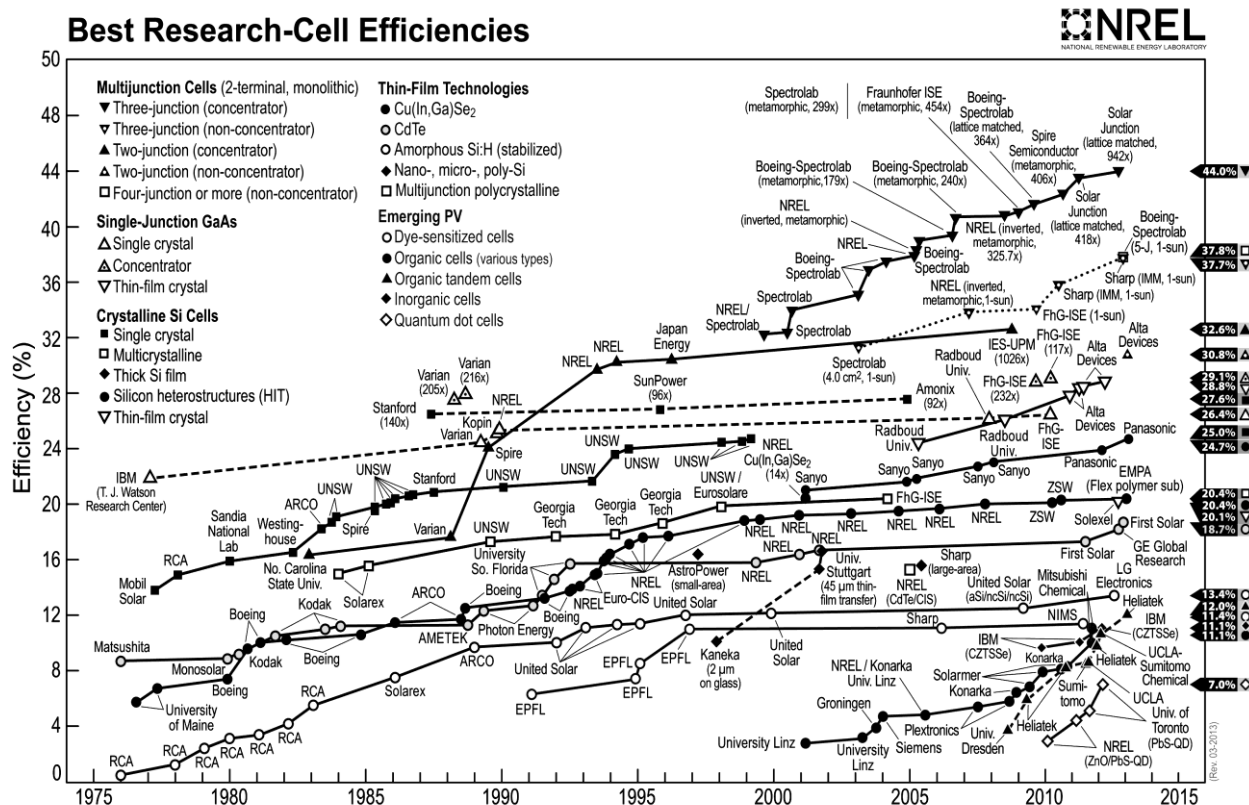


Рисунок 1.3 – Зображення відомих залежностей коефіцієнту корисної дії від технології виготовлення сонячної батареї [63]

Графічне зображення порівняльного аналізу технологій, який наведено на рисунку, показує видно, найкращий показник коефіцієнту, а саме 46,0%, має тризонний СЕ. Його технологічною особливістю є те, що він побудований за принципом гетеропереходів із концентратором світла у 942 АМ1. Хочемо зазначити, що цей показник є дуже високим, адже при використанні монокристалічного кремнію без концентратора найвищий показник коефіцієнту корисної дії, якого було досягнуто є 26%. І це є найвищий показник для застосування технології монокристалічного кремнію. Науковці його досягли ще наприкінці двадцятого сторіччя. Відома ще одна технологія створення сонячних батарей, а саме, застосування полікристалічного

кремнію без концентратору. Така технологія дозволяє отримати показник корисної дії, що дорівнює 20,5 % [62]).

Розглянемо відому структуру багатозонних сонячних елементів, що побудована на технології гетеропереходів, та має складну й водночас і кошовну структуру. Хоча, ми не виключаємо що саме ця кошовна та складна технологія виготовлення сонячних елементів в майбутньому буде мати лідируючі показники при використанні її, як основної у всіх видах виробництва енергії. Зазначимо переваги даної технології, адже про недоліки ми вже написали. Така технологія має широких спектр використання, окрім видимого спектру випромінювання світла, вона охоплює ближній інфрачервоний спектр до 1,9 мкм. Що не є властивим для інших технологій виготовлення сонячних елементів.

Хочемо зробити висновок, що розвиток технологій виготовлення сонячних елементів набуває стрімкого прискорення. Хоча, як за основу сонячної енергетики науковці становлять ФЕСБ. І тому, на наш погляд, удосконалення методів та приладів контролю СЕ і ФЕСБ необхідно направити на реальні режими роботи кремнієвих СЕ.

1.1.3. Побудова математичної моделі сонячного елементу

Математична модель СЕ є основою для розробки вдосконалених та зовсім нових технічних рішень щодо методів і приладів визначення вольт-амперних характеристик сонячних елементів та ФЕСБ. Саме за визначеною вольт-амперною характеристикою ми зможемо визначити технічні параметри для правильної роботи панелі. Розпочнемо аналітичне дослідження з огляду *p-n*-переходу для сонячних елементів, а саме гомогенний. Хочемо зауважити, що при такому переході нема ефекту відбиття від поверхні тильного контакту, а також відсутня поверхнева рекомбінація [63].

При однаковому значенні світлового потоку яскравість струму дифузії дорівнює показникам яскравості струму дрейфу. За формулою наведеною нижче можемо визначити показник яскравості струму дрейфу:

$$J_{dif} = J_{ph} + J_0 \quad (1.3)$$

Різниця числових показників J_{dif} та J_0 становить або ж можна сказати дорівнює щільність (яскравість) струму діоду J_d . Якщо прийняти сталі ідеальні умови для p - n -переходу, тоді можемо вважати, що щільність (яскравість) струму дифузії та показник щільності струму нагрівання сонячних елементів поєднати формулою, що наведено нижче:

$$J_{dif} = J_0 e^{\frac{U_{OC}}{V_T}}, \quad (1.4)$$

Після нескладних математичних перетворень, отримаємо:

$$J_{ph} = J_d = J_0 \left(e^{\frac{U_{OC}}{V_T}} - 1 \right), \quad (1.5)$$

де U_{OC} — показник напруги ХХ; $V_T = \frac{kT}{e}$ — числовий показник теплового потенціалу сонячної батареї.

Числовий показник напруги ХХ визначимо через фотоструму з застосуванням формули, наведеної нижче:

$$U_{OC} = V_T \ln \left(1 + \frac{J_{ph}}{J_0} \right). \quad (1.6)$$

Проте, хочемо зазначити, що показник напруги ХХ ні в якому разі не може бути більше за показник різниці потенціалів p - n -переходу. Якщо ж відбувається перевищення показнику різниці потенціалів p - n -переходу, тоді відбувається зупинка p - n -переходу.

У випадку коли електроди сонячних елементів знаходяться в положенні замкнення на зовнішнє навантаження, тоді напруга між електродами U стане менше за показник U_{OC} , що призведе до зниження струму діоду.

$$J = J_{ph} - J_d = J_{ph} - J_0 \left(\exp \left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right) \quad (1.7)$$

Хочемо зазначити, що схематичне рішення для ідеальних сонячних елементів представляє паралельно-з'єднані два вузли, по-перше, Генератор струму та , по-друге, Діод, що наведено на рисунку (рис.1.4).

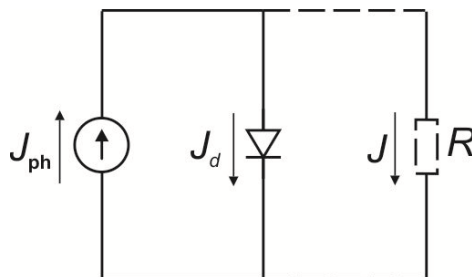


Рисунок 1.4 – Схематичне рішення для побудови ідеального сонячного елемента

Для визначення формули (1.7) ми скористались рівнянням для ідеального діоду, хоча зазначимо, що експериментально не вдалось підтвердити цей вираз. Таким чином нам необхідно було прийняти науково-технічне рішення, що дозволило б розв'язати це питання. Тому ми додатково ввели в знаменник виразу експоненту коефіцієнту A , щоб компенсувала похибки ВАХ [66,67]. Такі дії дозволили нам переписати рівняння (1.7) у новому скорегованому виді.

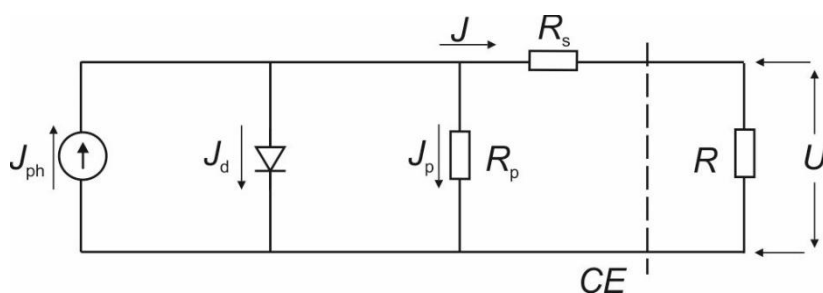


Рисунок 1.5– Зображення схеми сонячного елемента батареї

З урахуванням математичних перетворень та першого закону Кірхгофа запишемо формулу у вигляді:

$$J_{ph} = J_d + J_p + J. \quad (1.9)$$

Відповідно до закону Ома:

$$J_p R_p = U_p. \quad (1.10)$$

З урахуванням математичних перетворень виконаних вище та другого закону Кірхгофа запишемо формулу у вигляді:

$$-U_P + JR_S + U = 0. \quad (1.11)$$

Так як різниця потенціалів на діодному переході дорівнює U_P , тоді рівняння вольт-амперних характеристик для сонячних елементів фотоелектричної батареї можемо визначити за формулою СЕ [63, 64]:

$$J = J_{ph} - J_0 \left(\exp \left(\frac{eU + JR_S}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{JR_S + U}{R_P}. \quad (1.15)$$

Розглянемо схематичне зображення вольт-амперної характеристики та основні критичні точки та зони, що характерні для правильної роботи сонячної батареї та її елементів (рис. 1.6) [65].

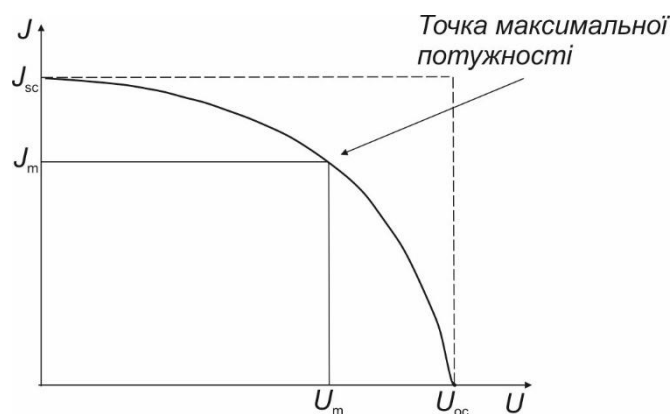


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення вольт-амперної характеристики

Як ми вже зазначали, що основних показників що визначають гарну роботу панелі є її ККД, який дорівнює відношенню потужності випромінювання, що надходить на частину поверхні панелі до його максимальної потужності сонячного елемента.

Хочемо описати ще один показник, що може говорити про роботу сонячних елементів, а саме про ff (formfactor). Це показник форми вольт-амперної характеристики сонячного елемента фотоелектричної сонячної батареї. Він дорівнює відношенню добутку щільності і напруги струму для максимального показника потужності сонячних елементів до добутку щільності і напруги струму поточних показників потужності сонячних елементів.

Аналітичне дослідження формул, що наведені раніше, показує таке, що коефіцієнт корисної дії сонячних елементів фотоелектричних сонячних батарей піддається впливу дифузійних та рекомбінаційних характеристик. При проведенні експериментальних досліджень ми враховували сталість більшості величин у рівнянні визначення вольт-амперних характеристик, а також враховували пропорційність струму сонячного елементу від освітленості сонячного елементу.

Наша дисертаційна робота присвячена вдосконаленню еквівалентної схеми сонячних елементів фотоелектричної сонячної батареї та розробці математичної моделі, з урахуванням вдосконаленою конструкції визначення вольт-амперних характеристик.

Методики визначення вольт-амперних характеристик

На теперішній час є відомою класифікація методів визначення вольт-амперних характеристик напівпровідників з кремнію. Вона є актуальною при застосуванні до сонячних елементів, адже матеріал з якого вони виготовлені однаковий. За класифікацією видно, що всі методи визначення вольт-амперних характеристик поділяються на два основні розділи [69-72]:

- по-перше, статичні;
- по-друге, динамічні.

Статичні методи визначення вольт-амперних характеристик напівпровідників з кремнію передбачають вплив на сонячний елемент, що є сталим та змінюється в часі, тобто є залежністю від час. А от динамічні методи передбачає надходження на сонячні елементи коротких імпульсів, що супроводжується одночасним визначенням відкликів приладу на ці імпульси.

Стан напівпровідникового приладу визначає тип вимірювань ВАХ. Таких є два основні типи. По-перше, ізотермічні, по-друге, ізодинамічні [73].

У технічній літературі, що присвячена питання фотоелектричних сонячних батарей, вітчизняних публікацій найбільш повною є вітчизняна

класифікація методів вимірювання вольт-амперної характеристики [77], хочемо поточнити, що вона не є обмеженою тільки розробками вітчизняних науковців, вона повним чином враховує світові тенденції, тільки написана групою українських вчених. У відповідності з нею визначають наступні методи вольт-амперних характеристик [77]:

- по-перше, статичні (так само як у закордонних літературних виданнях);
- по-друге, динамічні статичні (так само як у закордонних літературних виданнях);
- методи з негативним диференціальним опором статичні (відсутні у закордонних літературних виданнях);
- методи що базуються на вимірюванні теплового випромінювання (відсутні у закордонних літературних виданнях);
- методи з статистичною обробкою (відсутні у закордонних літературних виданнях);
- методи, що автоматизували (відсутні у закордонних літературних виданнях).

У результаті аналітичного дослідження напівпровідникових приладів було складено класифікацію методик визначення вольт-амперних характеристик, яку ми навели на рис. 1.7.

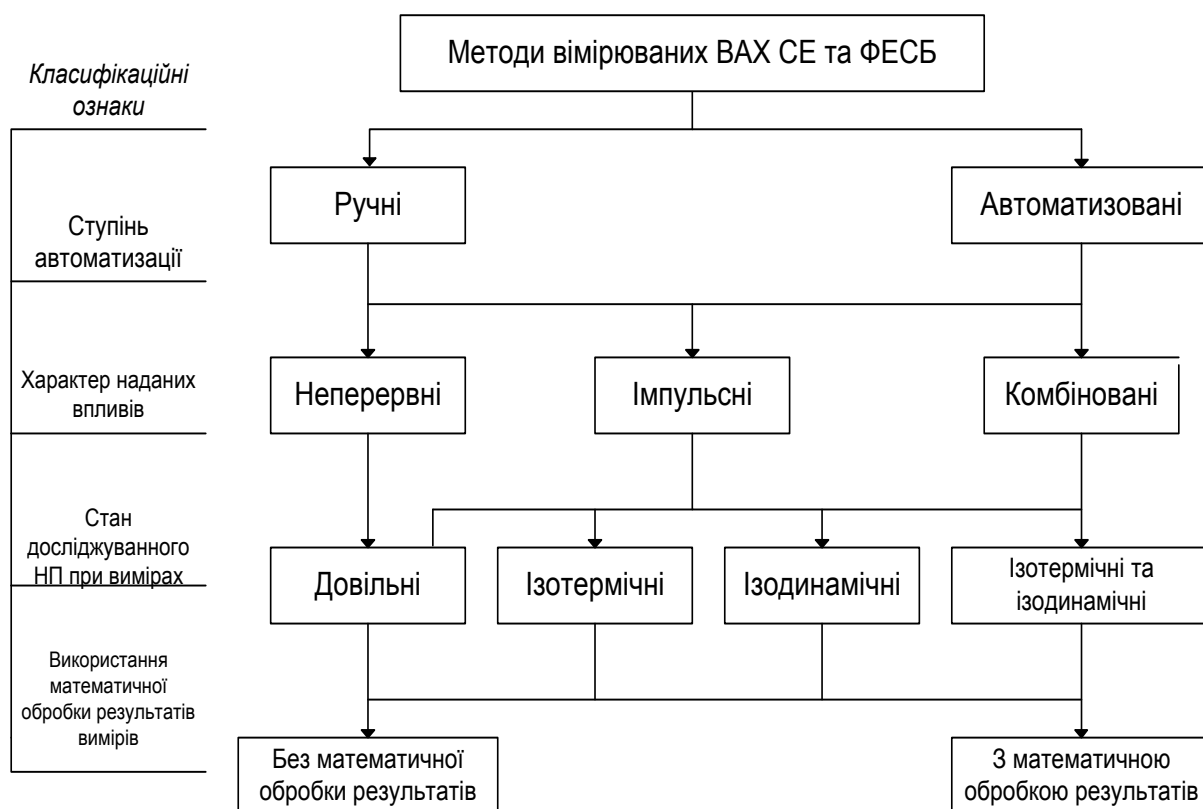


Рис. 1.7 –Методики аналітичного дослідження та визначення воль-амперних характеристик сонячних елементів

Є малоефективні методи визначення вольт-амперних характеристик сонячних елементів, що мають назву «ручних». Принцип їх дії полягає у фіксації теплового випромінювання. Також існують апаратні засоби для автоматизації процесу вимірювання, що дозволяють автоматизувати процес вимірювання таких характеристик. В якості таких засобів використовують осцилографи [78], та пристрої для розширення функціоналу [79].

Однак, ефективність цих систем в більшості залежить від характеру впливів, що поступають на площину сонячних елементів під час вимірювання вольт-амперних характеристик. Хочемо зазначити, що необхідно враховувати впливи, які характеризуються безперервним характером, імпульсним характером та комбінованим впливом.

Хочемо зазначити ,що найбільшого поширення для визначення характеристик мають імпульсні методи.

Основний принцип покладений у основу досліджень у такий спосіб полягає у послідовній подачі імпульсів, з прямокутною формою, з збільшенням амплітуди. У результаті дослідження характеристик можемо зазначити, що довжина імпульсів і довжина пауз є сталими (рис. 1.8,а).

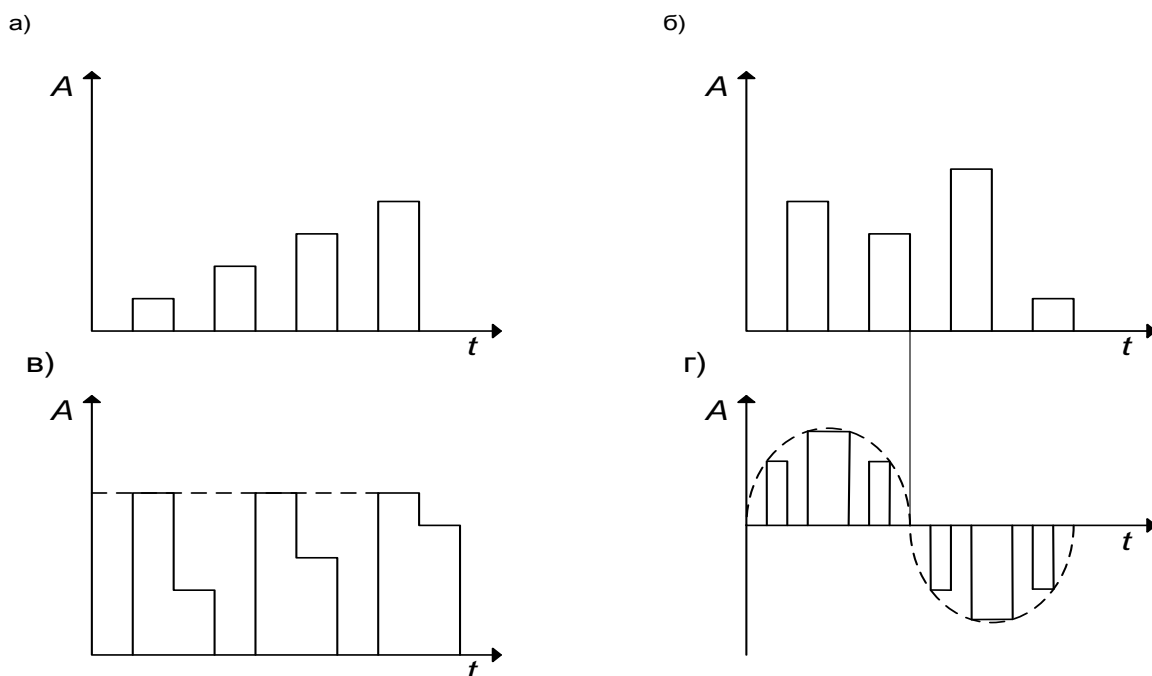


Рис. 1.8 – Зображення імпульсів

Перевагою нового методу є принцип роботи відповідно до якого амплітуда імпульсів впливу під час процесу вимірювання вольт-амперних характеристик випадково змінюється в межах необхідного проміжку по осі абсцис.

Відомо, що імпульсні методики визначення характеристик мають проміжки по осі абсцис з від'ємним опором [86].

Також існує імпульсний метод вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних елементів батарей. Цей процес відбувається вимірюванням ВАХ осцилографом. Визначені ВАХ методом імпульсної модуляції.

Для початку визначимо основні факти про властивості напівпровідників, по-перше, вони мають власні властивості, а це значить що і параметри імпульсної послідовності також будуть притаманні тільки окремим

напівпровідникам. І ті властивості, що спрацьовують для одних приладів не ефективні у других випадках. При визначенні вольт-амперних характеристик необхідно враховувати наступні параметри: тривалість імпульсу; ефективність. Паузи між імпульсами інколи є недостатніми для необхідного охолодження кристалів матеріалу (кремнію) сонячних елементів до того часу, як не виникнуть імпульси у наслідок накопичення теплової енергії. [88].

А от при використанні адаптивного методу вимірювання характеристик є ряд переваг, наприклад, автоматичний вибір параметрів імпульсів та мінімізація часу вимірювання. Відомо наступні стани, при яких ми можемо проводити вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних елементів фотоелектричних батарей, а саме, довільний, ізотермічний, ізодинамічний або ж комбінований.

Аналітичне дослідження класифікації визначення вольт-амперних характеристик сонячних елементів фотоелектричних батарей розроблені за ознаками часу визначення характеристик, інтенсивністю розігріву.

Прилади для контролю дефектів сонячних батарей

У лабораторних установок для визначення вольт-амперних характеристик застосовують у якості джерел сонячної енергії – імітатори з прожекторів потужність 1000 Ват, що є значенням, яке обирають для розробки більшості таких вимірювальних систем. Такі імітатори сонячного випромінювання штучного виготовлення характеризуються спектром; похибкою імітації спектру; апертурою діафрагми світлового променя; освітленістю та іншими параметрами.

Імітатор штучного випромінювання сонячної енергії зазначимо на рисунку 1.10. Джерелом випромінювання енергії при експериментальних дослідженнях використано газорозрядну лампу, що заповнена ксеноновим газом за заводською технологією виготовлення. Скляна колба лампи ксенонової лампи закріплено у металевому в корпусі 1. Конструкція джерела випромінювання є складною та не зручною і використанні, адже є значні

недоліки. По-перше, лампа має систему охолодження водою. По-друге, система охолодження скляної колби джерела освітлення та інші вузли імітатору також мають систему охолодження повітрям, яке нагнічується (закачується) в середину корпусу. Система імітатору штучного випромінювання сонячної енергії має власну оптичну систему, яку ми закріпили у тубусі 3. Стенд має допоміжні кронштейни 7, з застосуванням яких відбувається налаштування координат променя імітатору. Також для налаштування необхідних координат променя джерела випромінювання у конструкції передбачено гвинтовий механізм 5. Корпус імітатору спроектовано таким чином, що існує можливість повороту конструкції прожекторів, а їх показник розвороту фіксується шкалою 4. Прожектори мають стабілізований випрямувач 8, що регулює струм у діапазоні 1:5.

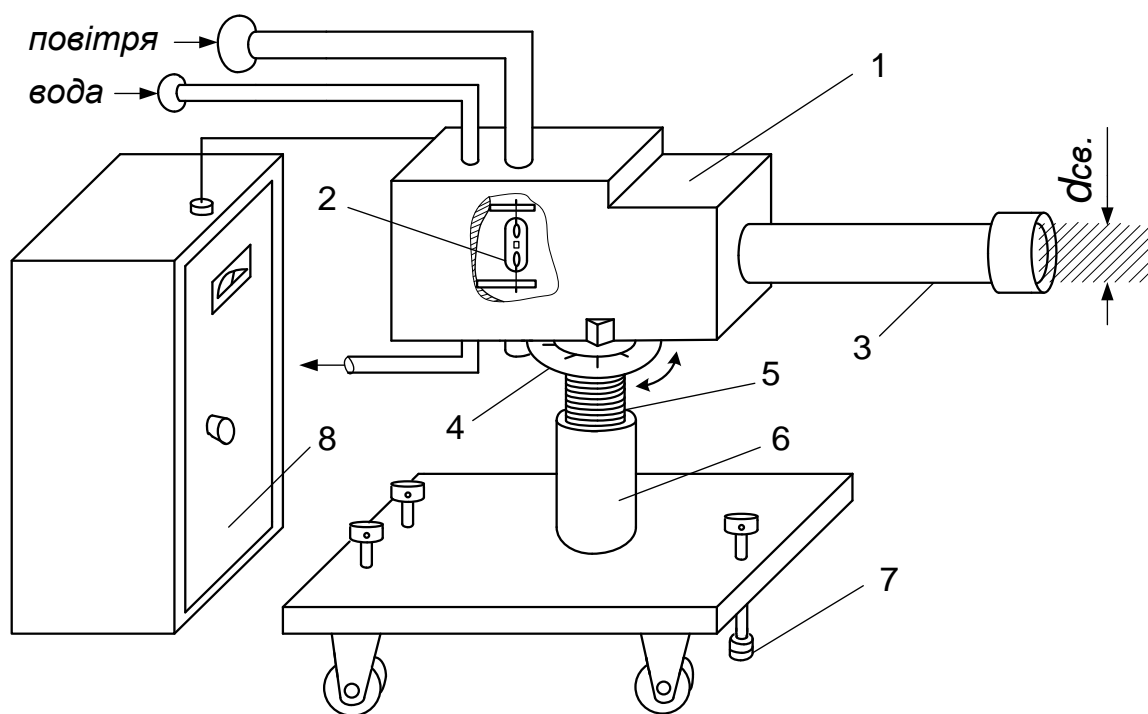


Рисунок 1.10 – Імітатор сонячного випромінювання

Для устаткування сонячної імітації, що має кремнієві фотодіоди, тобто кремнієві сонячні елементи не потрібна імітація випромінювання ультрафіолетового спектру довжин хвиль. Для таких випадків імітація сонячного випромінювання проводиться звичайними лампами розжарювання високої потужності. А виокремлення необхідного спектру довжин хвиль

проводять з застосуванням світлових фільтрів. Також у якості джерел для імітації випромінювання використовують лампи-фари, з галогенітом в скляній колбі, у корпус цієї лампи вбудовано відбивач виготовлений з багатошарового інтерференційного покриття для довжин хвиль частини видимого спектру до 0,4 мікрометрів.

Розглянемо принцип дії, що описано у наукових полягає у паралельному визначенні показників напруги та струму з застосуванням окремих каналів з застосуванням зміни опору в колі навантаження. Такі методики використовують для наукових експериментальних досліджень, що спрямовані на створення нових сонячних батарей.

До недоліків автоматизованої системи вимірюваннях воль-амперних характеристик фотоелектричних батарей слід віднести наступні позиції:

- навантажене програмне забезпечення, що є не зручним для користувача, адже його функціонал більший за необхідні дії.
- вимірювання спрямовані для визначення воль-амперних характеристик не можна застосувати для будь-якої сонячної батареї, у таких випадках необхідно залучати спеціалізоване устаткування;
- обробка результатів, а саме вольт-амперної характеристики, не можлива у режимі реального часу;
- для проведення імітації сонячного випромінювання, яке необхідне для визначення ВАХ існує потреба у площі імітаційного поля 1-3 м².

Для усунення недоліків пропонуємо наступні методики:

- використовувати природне випромінювання Сонця;
- використовувати імітатор сонячного випромінювання спроектований на декількох прожекторах-імітаторах [101].

На рисунку 1.11 представлено структурну схему автоматизованого стенду для визначення вольт-амперних характеристик сонячних елементів фотоелектричних батарей виробництва Keithley 4200-SMU. Основне призначення даного лабораторного устаткування полягає у контролі та

визначенні характеристик та параметрів, хочемо зазначити, що дана модель набула широкого використання для побутових користувачів, а не промислових виробництв з використання сонячних батарей. Це пов'язано з програмним функціоналом, він є надзвичайно простим у використанні, та вартістю даного устаткування, його можуть дозволити придбати звичайні громадяни та середні підприємці [102]. Всі результати визначення ВАХ цією установкою потребує персонального комп'ютеру. До основних переваг даного устаткування є опція налаштування вимірювання ВАХ при низьких показниках струму та зручний інтерфейс програмного забезпечення.

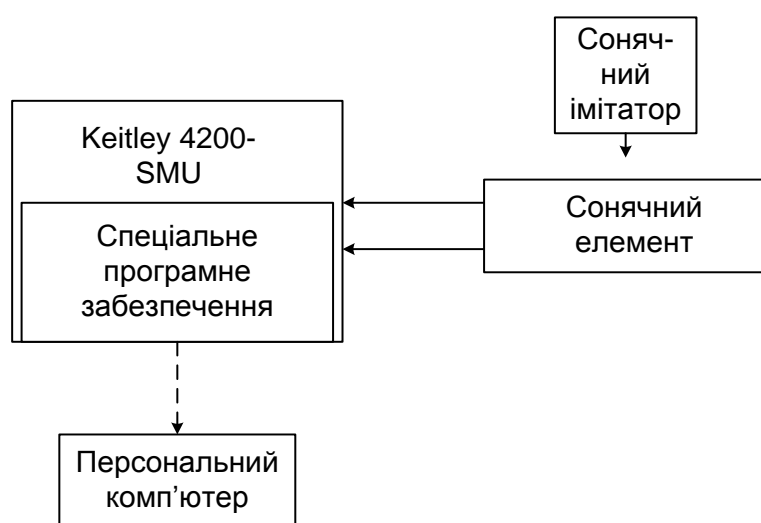


Рисунок 1.11 – Структурна схема визначення вольт-амперних характеристик

Ще до одного недоліку даного устаткування є відсутність можливості для проведення вимірювань імітаторів високої потужності. І таким чином, що є недоліком для одного виду вимірювань (для високопотужних імітаторів), є значною перевагою для імітаторів другого виду вимірювань (для малопотужних імітаторів або середньої потужності за низьких струмів). При вихідному струмі нижчому за один ампер, вимірювання не можливо проводити. У таких випадках використовують інше устаткування, зображення якого наведено на рисунку 1.12.

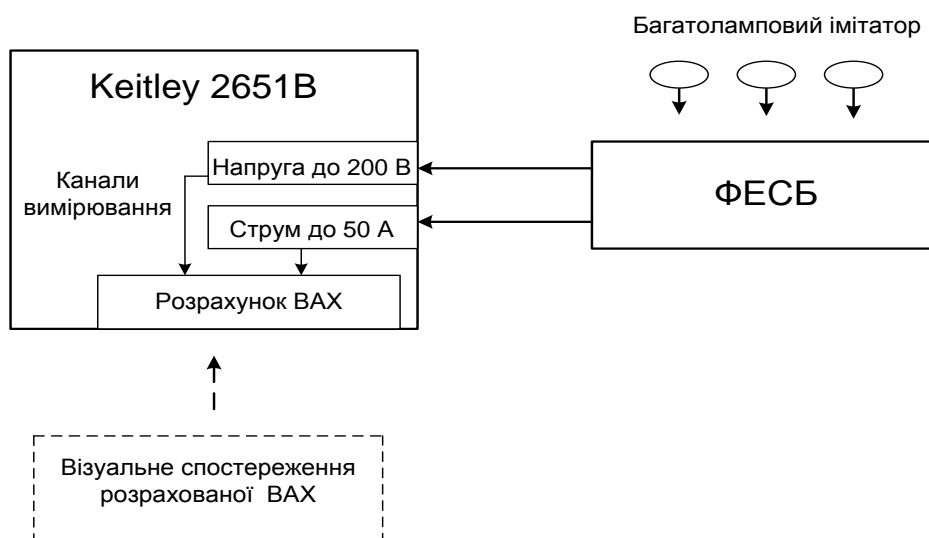


Рисунок 1.12 – Структурна схема імітаційного стенду для вимірювання
VAX

Для реалізації структурної схеми, що наведено на рисунку показники струму збільшуються до рівня 50 ампер, а конструкція імітатору містить не одну, а більше ламп-прожекторів, їх кількість залежить від потужності однієї та загальної потужності, які необхідно отримати для проведення дослідів (параметр потужності зазначений дослідником у технічному завданні до експерименту). Таке схематичне рішення побудови імітатору сонячного випромінювання має спрямування для дослідження високопотужних сонячних елементів фотоелектричних батарей.

До зазначених вище основних ідей та задач даної дисертаційної роботи слід віднести і аналітичне дослідження та вдосконалення методик визначення дефектів на сонячних елементах. Найбільшого застосування та простоти його реалізації серед вітчизняних науковців здобув метод інфрачервоної термографії. Проте цей метод має і недоліки до них слід віднести обов'язкова наявність системи охолодження. Методи інфрачервоної термографії поділяють на балометричні і методи, що спроектовано на фотоефекті [103]. Саме проблеми притаманні з охолодженням відповідають конструкції методів розроблених на фотоефекті. Зате у них є перевага, що змушує науковців іти на незручну роботу з системою охолодження, адже їх

спектральна чутливість перевищує балометричні методи у рази, а це суттєва перевага при виборі методу вимірювання. Хоча для балометричних методів визначення дефектів сонячних елементів спектральний діапазон ширший у порівнянні з методами інфрачервоної термографії, що зазвичай працюють у спектрі від 3-5 мкм.

При застосуванні методу інфрачервоної термографії та виявлення на поверхні сонячного елемента дефектів проводять при під'єднанні зворотного темнового струму. Звісно для такої конструкції необхідне і джерело живлення і охолодження, вони є зовнішніми блоками. Така теплова стимуляція дефектів є основою для динамічного визначення вольт-амперної характеристики та координат дефектів. Принцип роботи такого методу більш детально та структуровано наведено на рисунку 1.14.

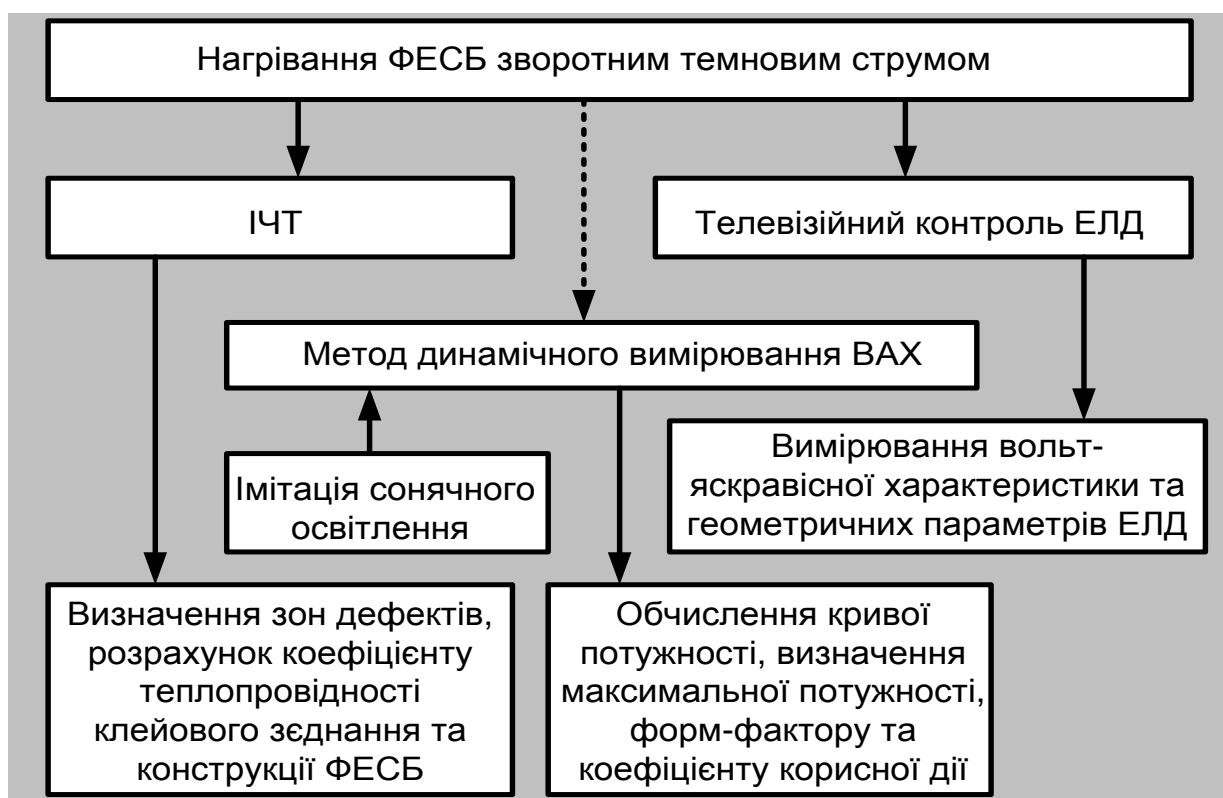


Рисунок 1.14 – Структура, що відтворює переваги у застосуванні та виборі методу контролю дефектів на сонячних елементах

Ми бачимо гарні перспективи для реалізації наших задумів щодо вдосконалення методів контролю виявлення дефектів на сонячних елементах та визначення вольт-амперної характеристики для них.

РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ СОНЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1. Динамічний метод вимірювання характеристик на лінійній розгортці струму

2.1.1. Базова R,L- модель динамічного методу вимірювання ВАХ

Для того, щоб провести дослідження всієї сонячної фотоелектричної батареї необхідно провести серію досліджень всі її сонячних елементів, тому вітчизняні та світові науковці ставлять перед собою задачу зробити цей процес автоматизованим з урахуванням різних варіацій баратей. Такі системи мають автоматизовано або хоча б півавтоматизовано проводити дослідження воль-амперних характеристик та виявляти дефекти методикою сканування поверхні. Для конструкцій таких вимірювальних систем необхідно додати цифровий осцилограф, що дозволить вимірювати та відтворювати данні по струму та напрузі для побудови вольт-амперної характеристик та програмного забезпечення з комп'ютером, що має плату відеозахоплення. Такий вимірювальний комплекс (система) має структурну схему наведену на рисунку нижче.

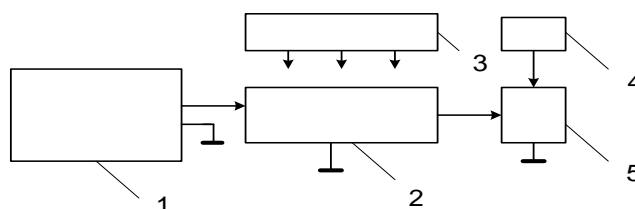


Рисунок 2.1 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів та вимірювання характеристик сонячних елементів: 1 – осцилограф, 2 – сонячний елемент, що досліджують, 3 – джерело випромінювання сонячної енергії, 4 – генератор імпульсів, 5 –комутатор

Методика дослідження характеристики відбувається при надходженні імпульсів до комутатору. Джерело випромінювання сонячної енергії ввімкнено, воно випромінює на ділянку сонячного елементу, водночас з транзисторний ключ і катушка індуктивності замикаються і комутаційний

струм зростає. Потрібно зазначити показник індуктивності та час проведення експериментального дослідження з дотриманням вимог щодо дотримання максимального значення струму а та водночас щоб він мав лінійну залежність від часу. У такий спосіб комутатор лініаризує розгортку струму і ми отримуємо вольт-амперну характеристику сонячного елемента, що досліджувався. По осі абсцис відкладено показник струму, а по осі ординат – напругу. Різниці дослідженої експериментальним шляхом вольт-амперної характеристики від ідеальної характеристики полягає у зміні осі ординат та осі абсцис місцями, що наведено на рисунку нижче.

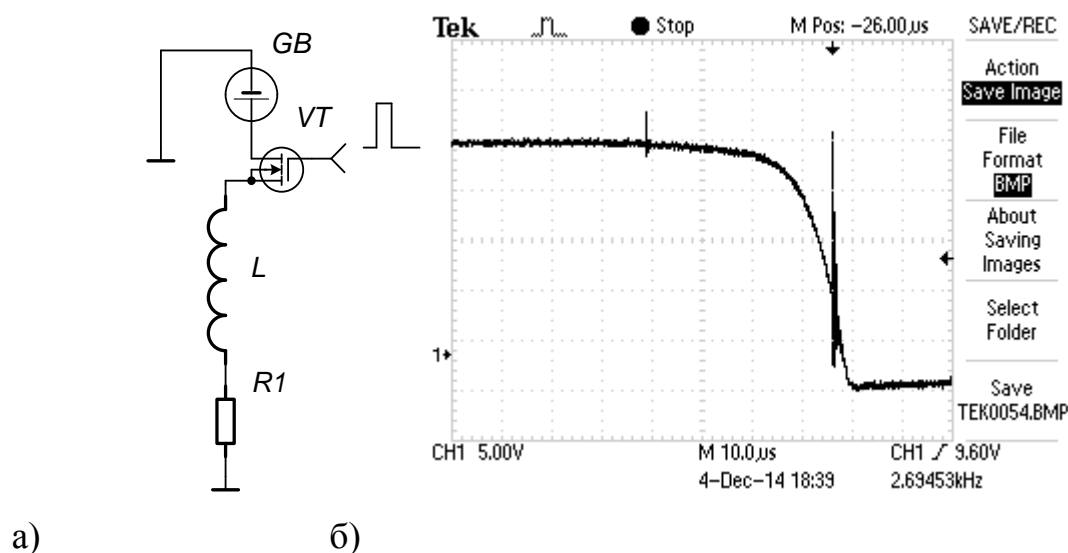


Рисунок 2.2, а) – Схематичне рішення кола розгортки; б) – Осцилограма з ВАХ

За горизонтальною осю розмірною величиною є струм, по вертикальній осі – напруга. Рисунки, що наведені нижче, наводять зображення отриманих вольт-амперних характеристик у класичному виді та «перегорнутому» що визначені експериментально з застосуванням світлових фільтрів.

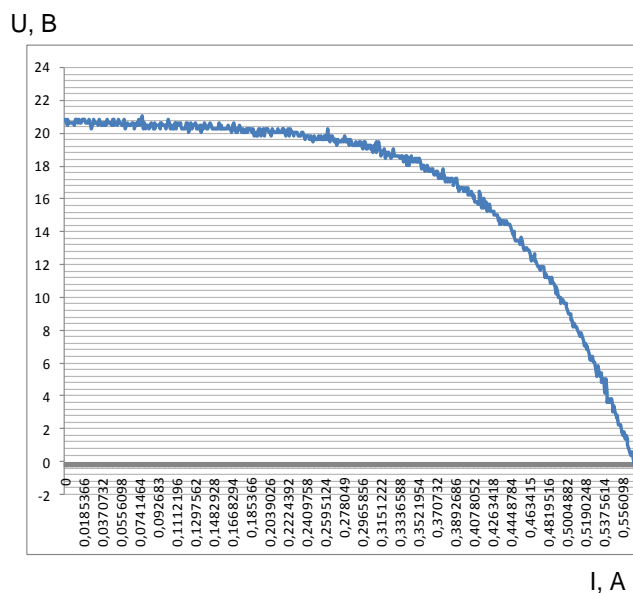


Рисунок 2.3 – Зображення воль-амперної характеристики (I-U)

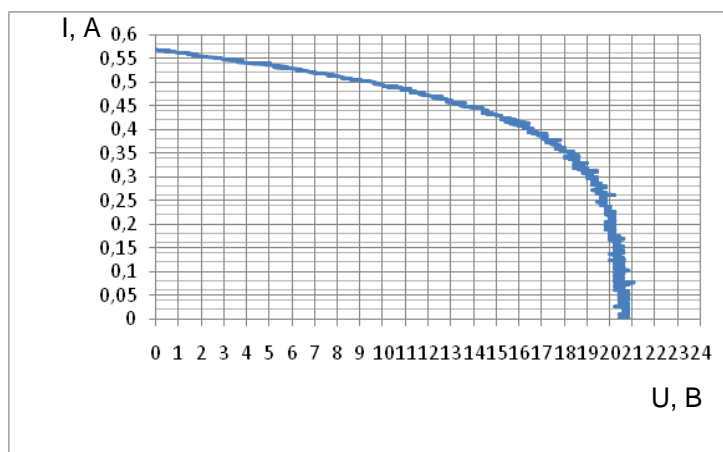


Рисунок 2.4 – Зображення воль-амперної характеристики (U-I)

Лінійне розгортання струму полягає у основі нашого методу дослідження вольт-амперних характеристик сонячних елементів, тому можемо сказати, що процес дослідження характеристик формується на перехідному процесі, що утворюється в колі навантаження сонячного елемента. У цьому колі відбувається замкнення ключу, що має показник опору який дорівнює опору, внесеному до вимірювальної схеми для створення незалежного каналу вимірювання струму. Таке схематичне рішення ми зобразили на рисунку, що наведено нижче.

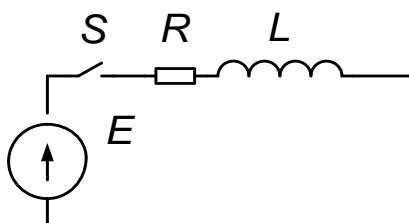


Рисунок 2.6 – Схематичне рішення лінійної розгортки струму

У запропонований метод запропоновано проводити замикання на сонячному елементі. Скористаємось законом Кірхгофа, тому можемо записати рівняння для вмикання RL – кола при сталій напрузі у вигляді рівняння наведено нижче

$$Ri + Ldi/dt = U \quad (2.1)$$

Як видно з 2.1 напруга дорівнює сумі встановленої та вільної складових струму:

$$i = i_{\text{вст}} + i_{\text{в}} \quad (2.2)$$

Запишемо формулу для визначення першої складової у вигляді:

$$i_{\text{вст}} = U/R \quad (2.3)$$

Запишемо формулу для визначення другої складової у вигляді. Після чого запишемо формулу для визначення повного рішення диференціального рівняння (1.1) у вигляді:

$$i = U/R(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.5)$$

Розрахуємо залежність струму від часу для схеми з дотриманням наступних показників параметрів: напруги 23 вольт, опору 0,061 ом; індуктивності 8,19 мікрогенрі, частота імпульсів 2,7 кілогерц. З такими показниками параметрів було проведено ряд експериментальних досліджень і отримано графічні залежності наведені на рисунках нижче.

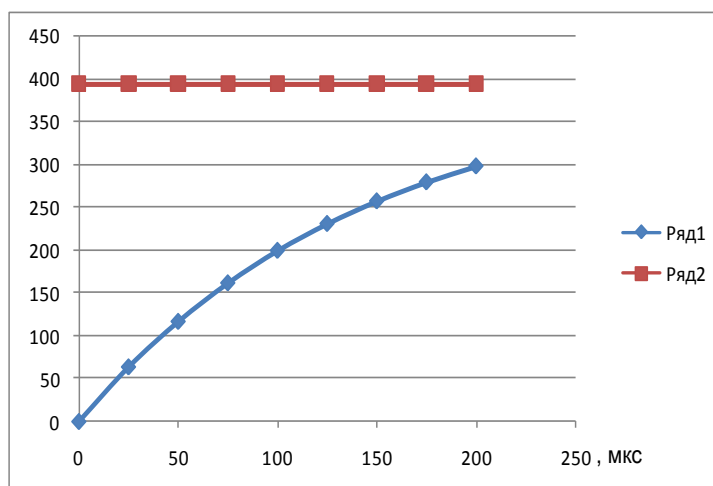


Рисунок 2.7 – Графік залежності струму

З отриманої графічної залежності видно, що на часовому проміжку до 25 мікросекунди залежність має лінійний вид, тому можемо вважати цей час робочим для проведення лінійної розгортки струму під час імпульсної дії на сонячний елемент. Також необхідно за отриманим показником у 25 мікросекунди провести обмеження струму сонячного елемента під час максимального навантаження струмом, тобто при короткому замкненні. Хочемо ввести обмеження щодо застосування даного схематичного рішення, а саме, таку схему не використовують при низьких показниках опору ключа. Також існує ситуація, при якій в режимі, що наближено до КЗ, сонячний елемент трансформується на джерело струму і отримуємо ситуацію при якій струм не залежить від показника напруги.

У графічному зображенні ідеалізована ВАХ набуває форми прямокутника, в якому горизонтальна ланка відтворює джерело напруги, а вертикальна – джерело струму.

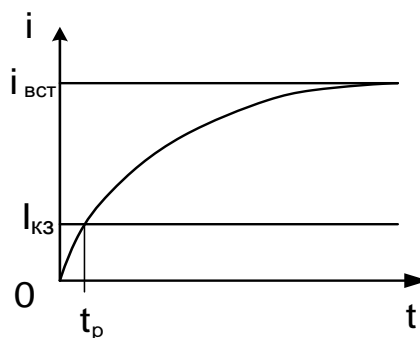


Рис. 2.7 – Принцип обмеження часу розгортки струму ФЕСБ

Час розгортки струму, як це наведено на рис. 2.7, дозволяє перекрити повний діапазон струму ФЕСБ лінійним проміжком. Доведення до лінійного типу розгортки відбувається експериментальним шляхом підбору параметрів опору, індуктивності та часу з дотриманням максимального наближення до лінійності. Зображення прямої, що утворюється, отримаємо при розкладанні формули (2.5) у ряд Тейлора при умові, що час дорівнює нулю, тоді отримаємо рівняння:

$$i = (U/R)((1 - Rt/L + 1/2(Rt/L)^2 + \dots)) \quad (2.6)$$

Нам достатньо для визначення першого члену ряду Тейлора, що наведено у формулі нижче:

Можна сказати, що нами отримано практичний результат, а саме, підвищення струму залежність від індуктивності, а показник напруги є сталим значенням.

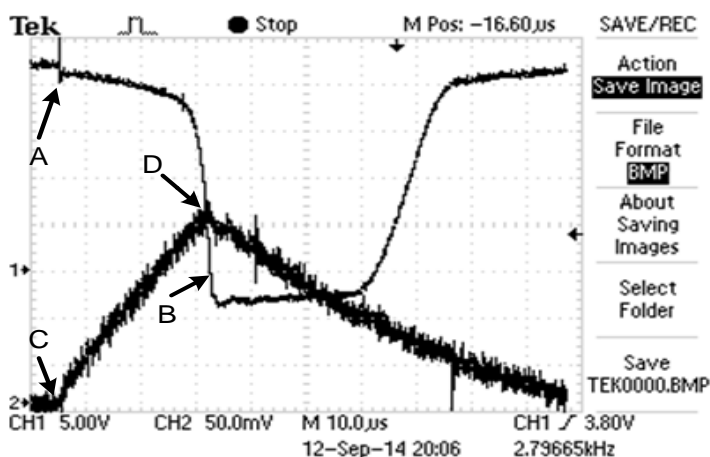


Рисунок 2.8 – Зображення осцилограми

Час розгортки вольт-амперної характеристик дорівнює 6,3 мкс. За умови, що струм замикання дорівнює 0,36ампер, тоді можемо розрахувати показник швидкості цього процесу. Для цього поділимо один показник на інший, та отримаємо 0,057 А/мкс.

2.1.2. Розробка R,L,C- моделі

Розглянемо ще одне схематичне рішення з розроблення моделей визначення характеристик вольт-амперного типу. Таке схематичне рішення

має перевагу, адже у процесі виготовлення схеми враховано параметри сонячних елементів [112]. Параметри, що враховують при проектуванні такої моделі є ємність і параметр опору, таку схему наведено на рисунку нижче.

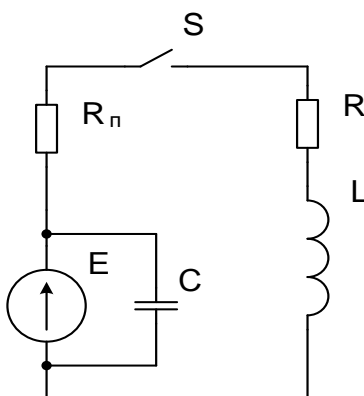


Рисунок 2.9 – Схема R,L,C для лініаризації струму

Відомо, що графічна залежність напруги від ємності має нелінійну форму, а нам необхідно проводити вимірювання тільки на лінійній ділянці, таке привнесення дестабілізуючих елементів поставило нову задачу для вимірювання послідовного опору сонячних елементів. Аналітичне дослідження вольт-амперних характеристик при застосуванні коливального процесу дало змогу графічно визначити період коливань T і декремент коливань α , після чого визначити ємність C при застосуванні формул.

На зображенні 2.10 представлено ВАХ ФЕСБ на основі полікристалічного кремнію із параметрами 60 Вт, індуктивністю 41,7 мкГн та опором 55 міліом.

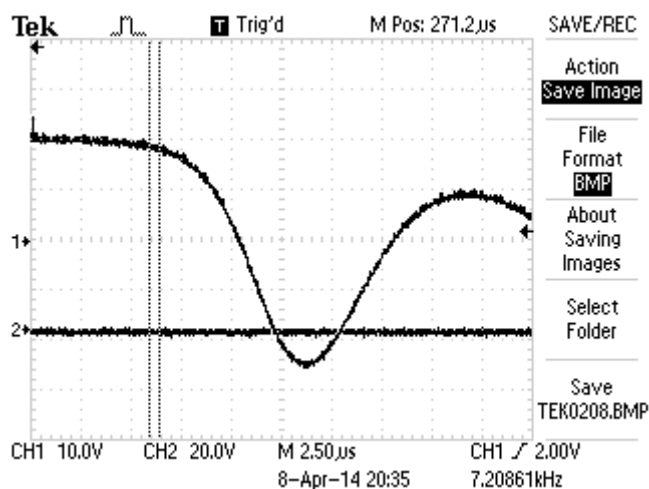


Рисунок – Графічне зображення осцилограми коливального процесу в колі розгорнення струму ФЕСБ

Проведемо необхідні обрахунки електричних параметрів сонячних елементів з використанням показників, що отримано з осцилограми.

Декремент коливань напруги визначимо за формулою:

$$|U_-|/U_+ = e^{\alpha T/2} \quad (2.24)$$

Після проведених математичних перетворень отримаємо значення α за формулою

$$\alpha = (2/T) \cdot \ln(|U_-|/U_+) \quad (2.25)$$

З дотриманням технічних параметрів відповідно до рисунку 2.22 отримаємо:

$$\alpha = (2/0,0000115) \cdot \ln(25,5/9) = 0,181 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}.$$

Із використанням формули (2.22) можемо розрахуємо послідовний опір фотоелектричних сонячних батарей R і отримаємо :

$$R = 2\alpha L - R_{\pi} \quad (2.26)$$

Відповідно до схеми (рис. 2.2) отримаємо показник опору, що дорівнює:

$$R = 14,55 \text{ Ом.}$$

Електрична ємність сонячного елементу визначається за формулою наведеною нижче

$$C = (L(2\pi f)^2 + (R + R_{\pi})^2/4L)^{-1} \quad (2.27)$$

Відповідно схеми , що наведено на рисунку. 2.2 отримаємо показник ємності:

$$C = 72,4 \text{ нФ.}$$

Ось так, розрахунками, що отримано нами, доведено їх практичну цінність вимірювання ВАХ імпульсним методом, у тому числі і вирішено питання щодо вимірювання електричної ємності та значення послідовного опору сонячної батареї. Як виявилось, що для цього необхідно усунути зворотний діод транзисторного ключа у схемі лінійної розгортки струму.

2.2. Вдосконалення моделей

2.2.1. Вдосконалення моделей виявлення дефектів сонячних елементів

Відомий і є широкопоширеним метод визначення координат та кількості та площин дефектів сонячних батарей та їх елементів. Він розроблений на ефекті нагрівання сонячних елементів до високих температур, однак, це призводить до обмеження застосування методу для всіх випадків. Розглянемо схему наведену нижче на рисунку 2.14, вона має назву еквівалентної.

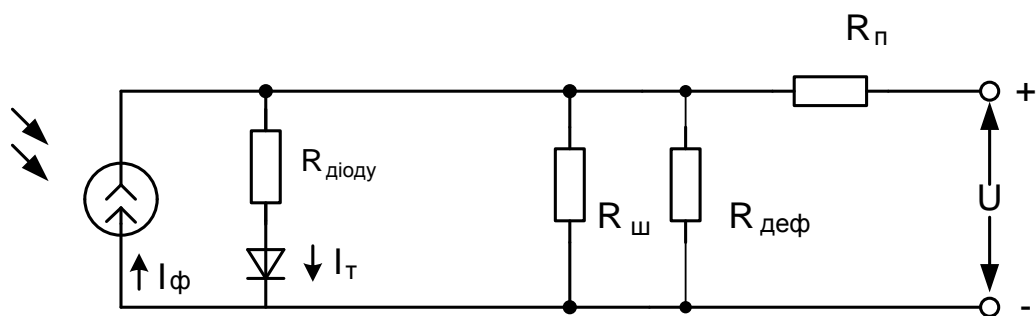


Рисунок 2.14 – Еквівалентна схема

Розмірність опорів наведеного схематичного рішення повинні бути обмежені за розмірністю. А саме найнижче значення має послідовний опір, за нам з схемою наростання іде опір діоду, після нього має бути більшим або дорівнювати опір дефекту, а найбільший показник має бути у опору шунту.

За такою схемою можна проводити вимірювання і вона є робочою тільки у випадку присутності дефектів на сонячних елементах фотоелектричної батареї. У інакшому випадку таке схематичне рішення є не робочим. У якості шунта у таких схемах використовують діод Шоткі у наслідок чого додається ще одна гілка темнового струму. Таке схематичне рішення з додавання діоду Шоткі наведено на рисунку нижче.

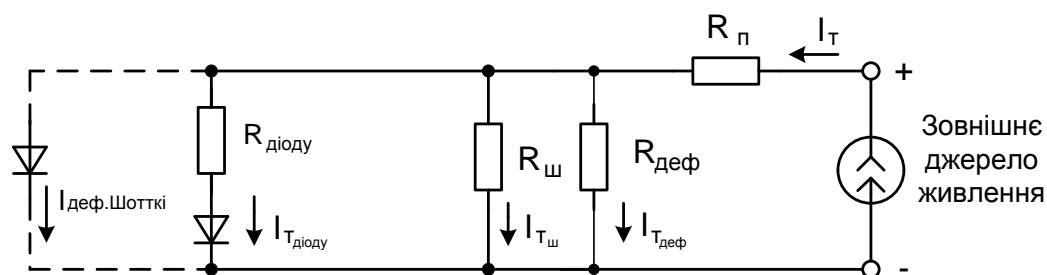


Рисунок 2.14 – Схематичне рішення з додаванням гілки і діоду Шоткі

У такому випадку змінюється розмірність опорів. А опори наведеного схематичного рішення повинні бути обмежені за розмірністю. А саме

найнижче значення має опір шунту, за ним з схемою наростання іде опір дефекту, після нього має бути більшим або дорівнювати опір діоду, а найбільший показник має бути у опорі Шоткі.

Однак при класичному з'єднанні сонячних елементів у фотоелектричні батарею важливо виявляти дефекти, що мають свою природу виникнення під час електричного, а цього не можна виконати з додаванням діоду Шоткі, тому пропонуємо нове схематичне рішення, що в змозі вирішити це вимірювання. Схематичне рішення наведено нижче на рисунку

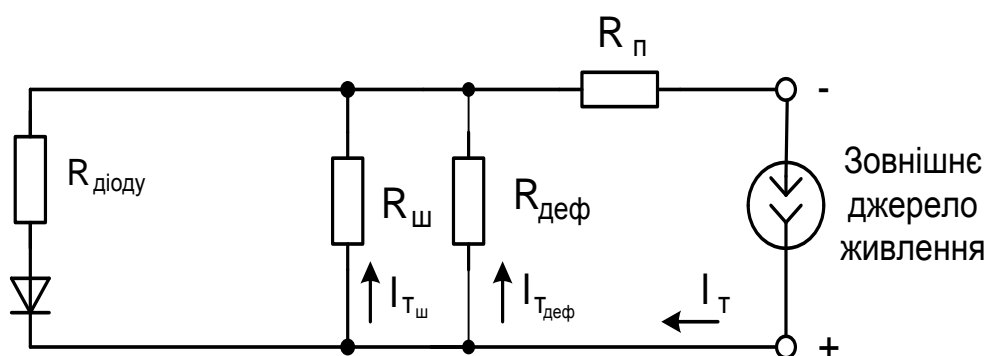


Рисунок 2.15 – Схематичне рішення з додаванням зворотного темнового струму

Як відомо з науково-технічної літератури, темновий струм має природу розкладання на дві частини і іде скрізь опір дефекту через його низький показник, та не йде через дефекти сонячних елементів через їх під'єднання до зворотньої напруги.

Якщо дефекти присутні на поверхні сонячних елементів, тому відбувається зміна форми вольт-амперної характеристики сонячного елементу фотоелектричної сонячної батареї. У випадку присутності дефекту характеристика буде більше відхилятися від форми прямокутника в залежності від збільшення кількості дефектів сонячних елементів і чим меншою є значення опорів шунта, як наведено на рисунку нижче.

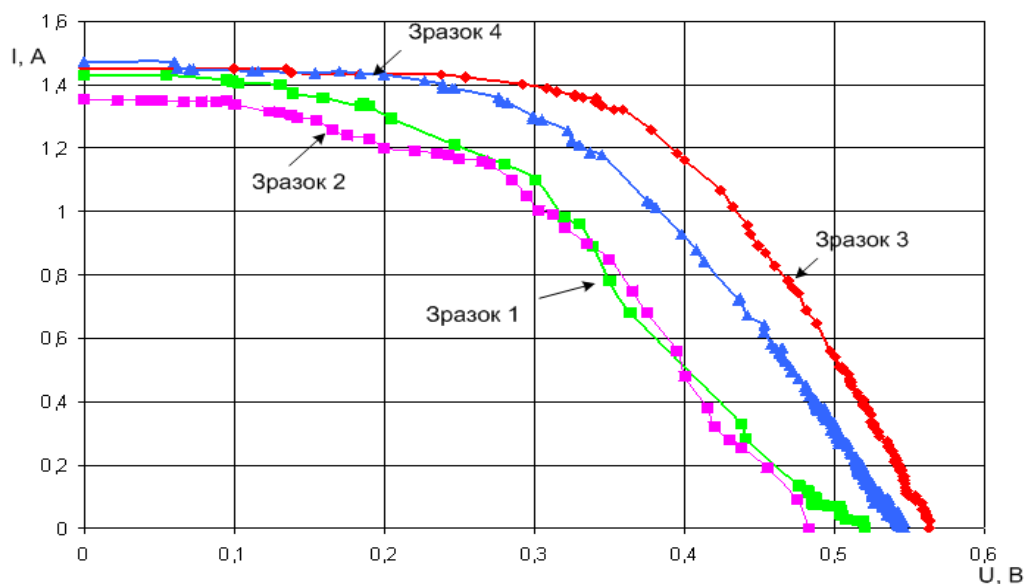


Рисунок 2.16 – Вольт-амперні характеристики з різним показником наявності дефектів на поверхні сонячного елемента

При тепловій дії випромінюванням сонячного елемента відбувається додаткове нагрівання місць дефектів.

На рисунках наведених вище видно, що на поверхні СЕ є дефекти, що було визначено в процесі нагрівання їх темновим струмом можливо розрахувати координати локальних перегрівів сонячних елементів.

РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

3.1. Розробка системи динамічного вимірювання ВАХ

У основі методу розробки системи визначення вольт-амперних характеристик у динамічний спосіб спроектовано на природі лінійної розгортки струму

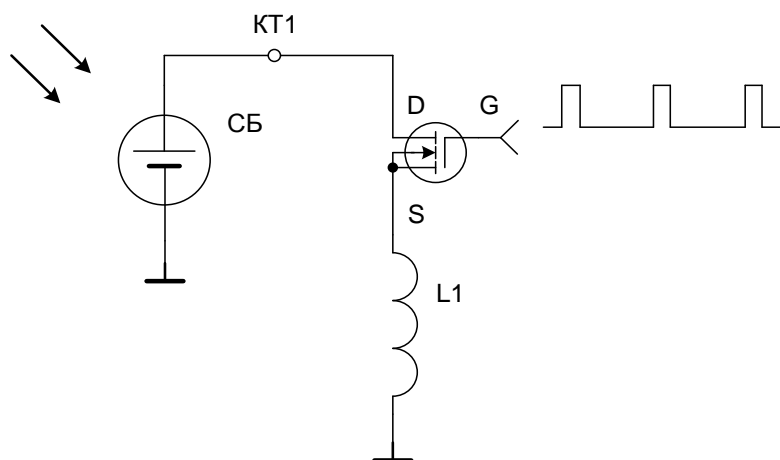


Рисунок 3.1 – Схематичне рішення реалізації лінійної розгортки струму

Варіант схеми генератора на мікроконтролері AVRATmega має ряд переваг щодо агрономічних і мінімальних розмірів та енергоспоживання, що на сьогодні у світі є одним з найважливіших аспектів інженерного приладобудування. Хоча таке схематичне рішення щодо лінійаризації струму має і недоліки, а саме, амплітуда вихідного сигналу дорівнює 5 вольт.

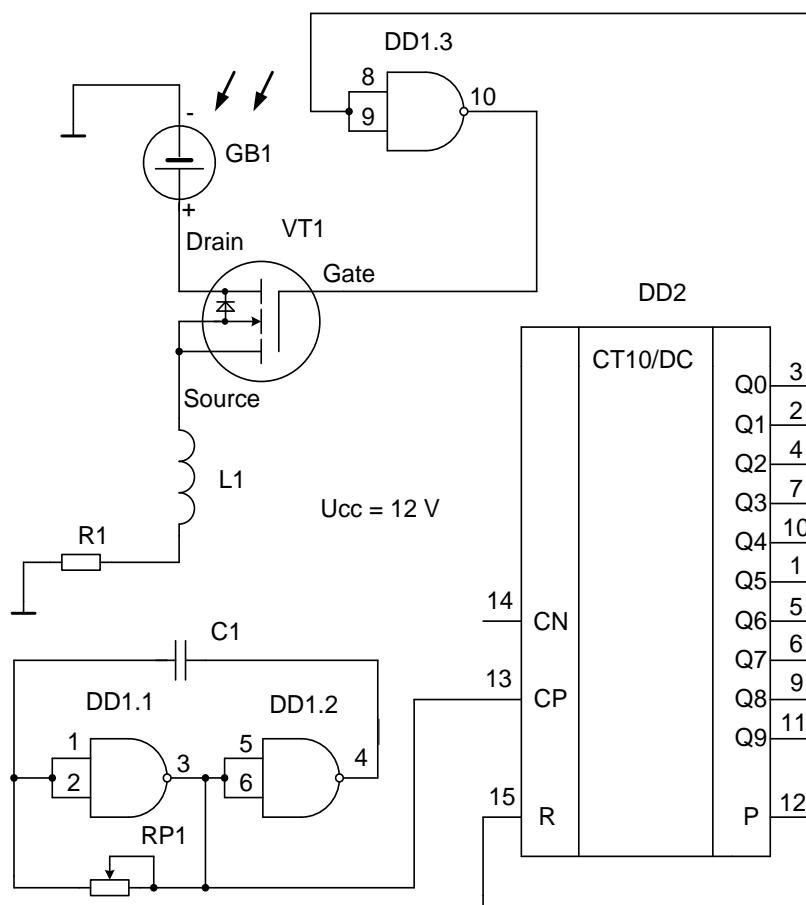


Рисунок 3.2 – Схема електрична принципова пристрою лінійної розгортки струму ФЕСБ

Зображення напруги, що виникає при нульовому значенні вольт має вигляд, що наведено на рисунку нижче.

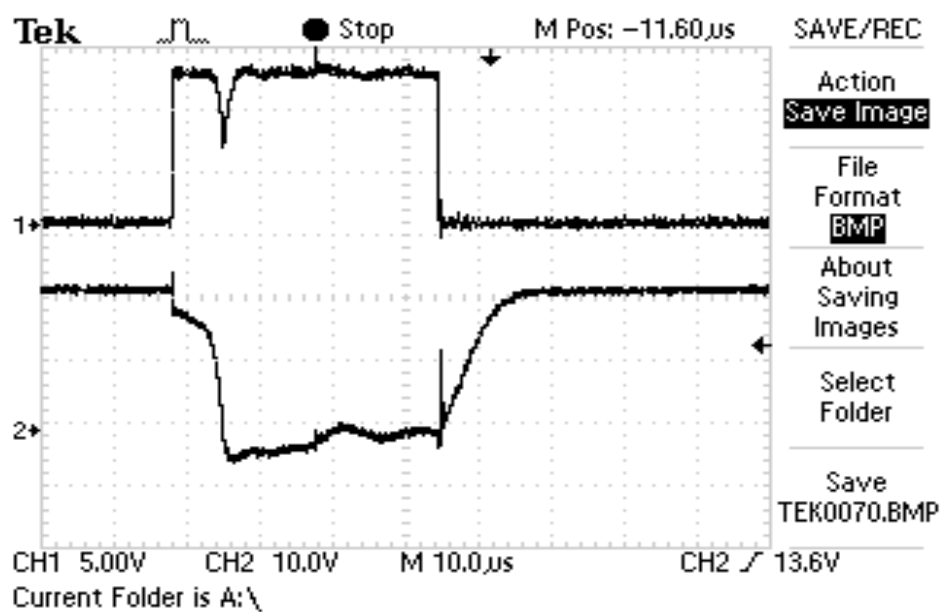


Рисунок 3.3 – Осцилограма

Імпульси розгортки утворюють сигнали (рис. 3.4).

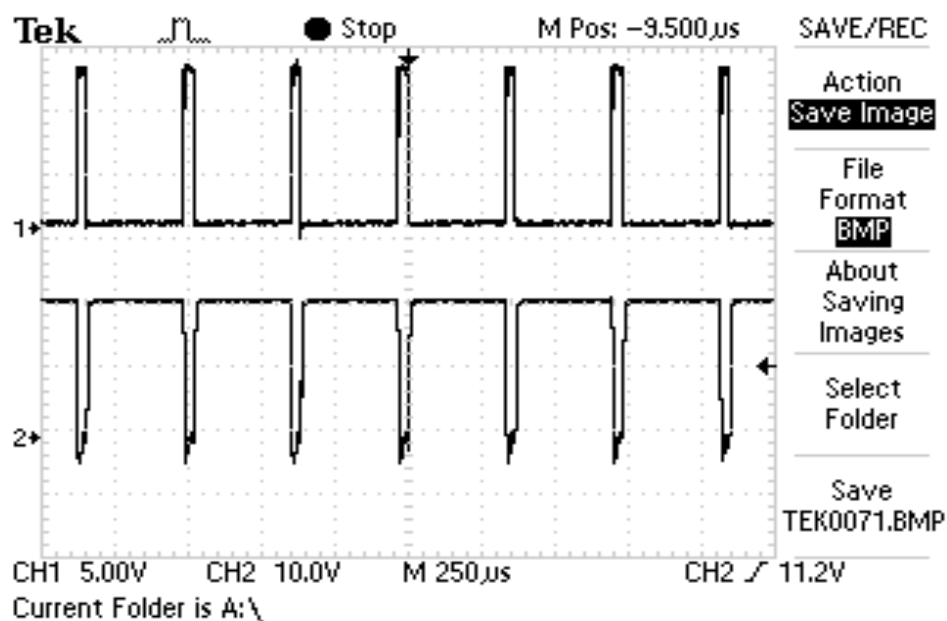


Рис. 3.4 – Осцилограма при 30 Вт

Схема, для якої було проведено симуляцію у відомому програмному забезпеченні спрямованому для моделювання процесів без застосування їх реальної присутності, а з використанням моделей вузлів електричних елементів, приладів тощо. Схему наведено на рисунку нижче.

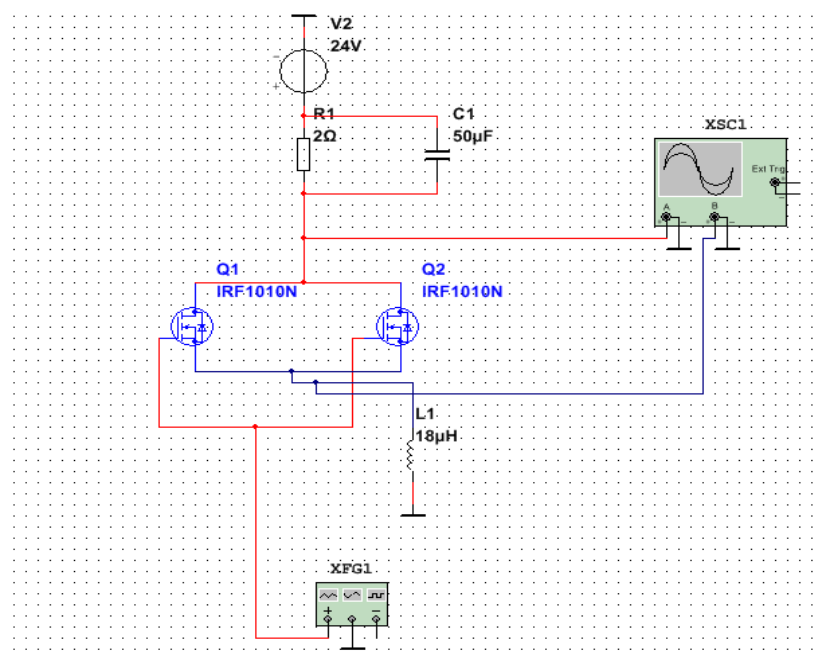


Рисунок 3.5 – Схематичне рішення щодо підключення транзисторів

Експериментальне дослідження процесу симуляції проводили з використанням 2 транзисторів (2,7 кілогерц), у результаті чого отримано осцилограму наведену на рисунку нижче.

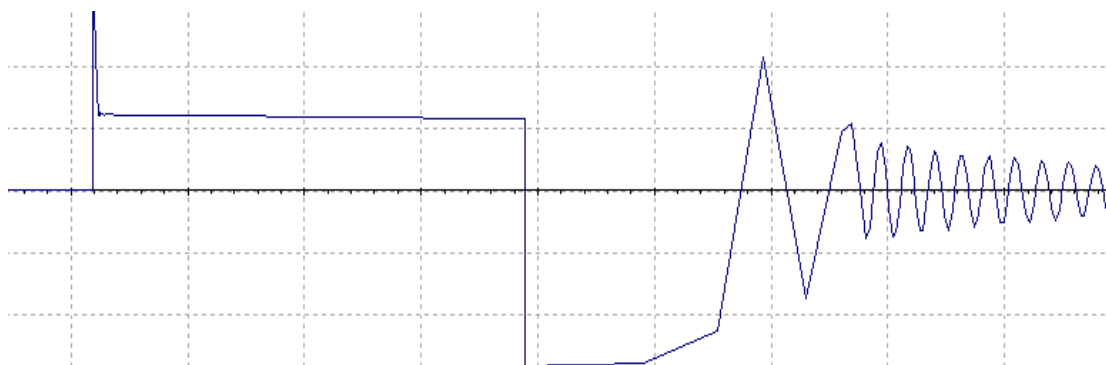


Рисунок 3.6 – Осцилограма

Для виконання експериментальних досліджень ми використовували у якості джерела випромінювання сонячної енергії джерело типу PG 500, зображення якого наведено на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Прожектор типу PG 500

Використання 500 Вт - джерел випромінювання дає можливість побудувати рівномірне світлове поле. Живлення джерело випромінювання відбувається від стандартної електричної мережі. Світло-технічні характеристики джерела випромінювання наступні - світловий потік дорівнює 7200 люмен (показник зазначається для одного прожектора), що у перерахунку для загального показника світлового потоку для всієї імітаційної системи 144000 люмен. Схематичне рішення щодо розташування джерел випромінювання наведено на рисунку нижче.

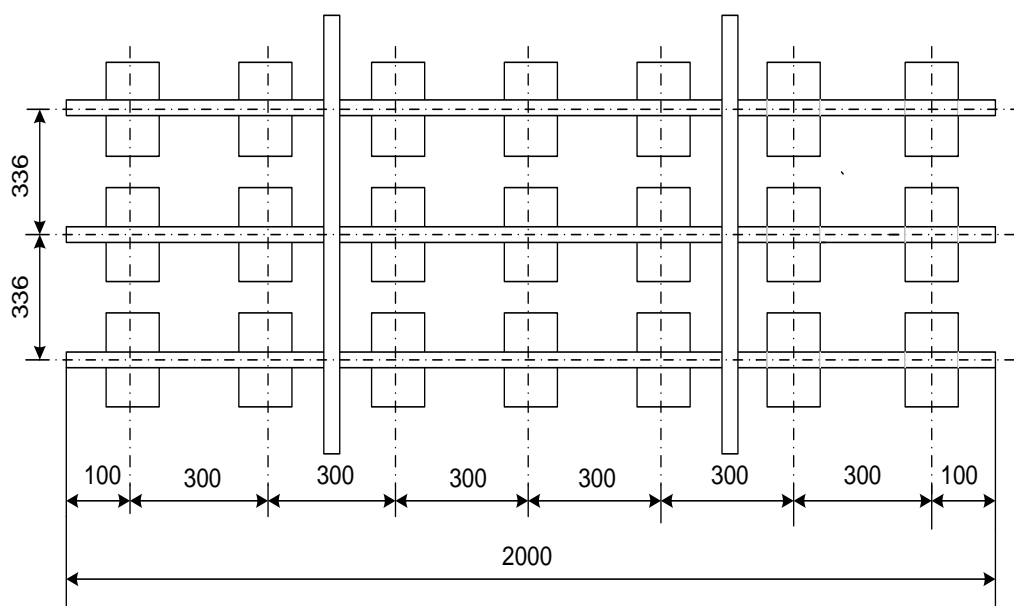


Рисунок 3.9 – Схематичне рішення щодо розташування джерел випромінювання

Розроблене схематичне рішення щодо розташування джерел випромінювання було апробовано при проведенні експериментальних досліджень кремнієвих фотоелектричних сонячних батарей у лабораторії кафедри національного технічного університету. Навантаження цього устаткування відбувалось під потужністю 30 Вт та 140 Вт у режимі вимірювання напруги холостого ходу та струму короткого замикання. Результатом експериментальних досліджень що було проведено під зазначеним навантаженням є відповідність нормальній роботі батарей, на яких проводили дослідження.

Рівномірність освітлення під час експериментальних досліджень визначалась люксометром типу Ю-117, результатом вимірювань люксометром є визначення показника нерівномірності при освітленні сонячних батарей. Воно знаходилося в межах експериментальних умов, а саме, 10%.

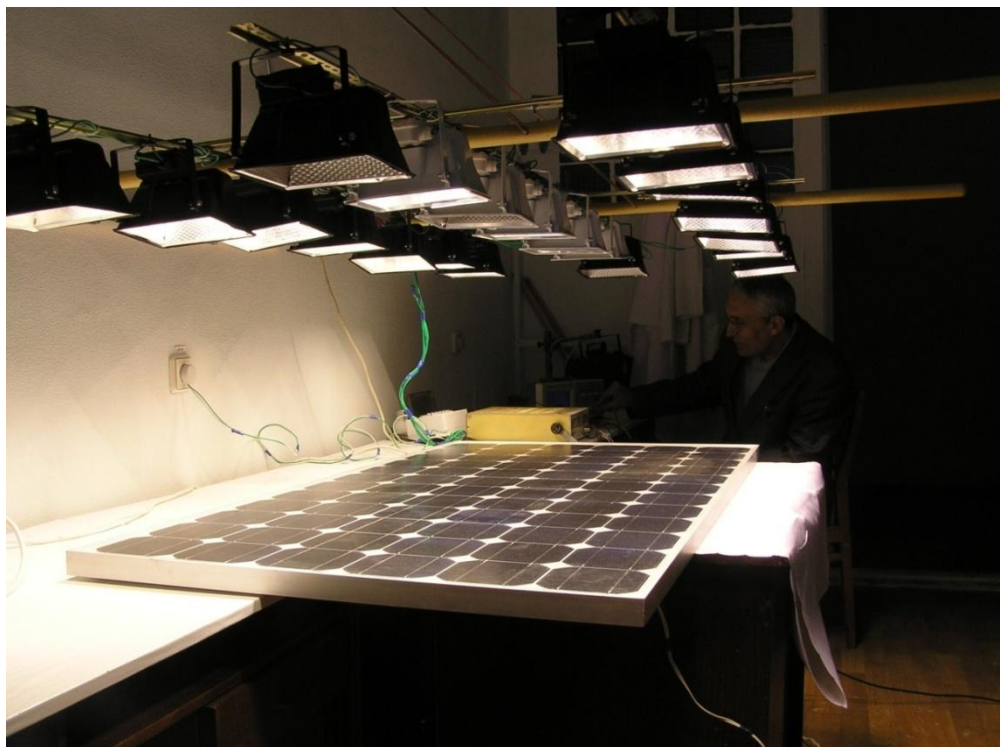


Рисунок 3.10 – Зображення експериментального стенду з джерелами випромінювання сонячної енергії.

Рівномірність освітлення під час експериментальних досліджень визначалась люксометром типу Ю-117, результатом вимірювань люксометром є визначення показника нерівномірності при освітлені сонячних батарей. Воно знаходилось в межах експериментальних умов, а саме, 10%.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ

У попередніх розділах ми провели аналітичне дослідження відомих схематичних рішень щодо виявлення дефектів та визначення вольт-амперних характеристик для сонячних елементів фотоелектричних батарей. Спираючись на ці данні, було спроектовано власний лабораторний експериментальний стенд для дослідження характеристик та виявлення дефектів. Він спроектований з застосуванням джерел випромінювання типу прожектор, що може давати світловий потік у 144000 люмен, що імітує випромінювання сонця.

4.1. Результати експериментальних досліджень новим методом

4.1.1. Статичні вимірювання характеристик

У міжнародні практики напрацьовано стандарти, що регламентують роботу та вимірювання характеристик сонячних батарей. Тому при проведенні експериментальних досліджень ми повинні дотримуватись міжнародних правил та вітчизняних, хоча власних стандартів у нас не напрацьовано. Тому будемо дотримуватись міжнародного стандарту IEC904-1[142].

Дотримуючись всіх вимог прописаних у стандарті при проведенні експерименту, ми змогли отримати у якості результату дослідженні два типи вольт-амперних характеристик, а саме, світлові і темнові. Освітленість сонячних елементів проводили люксометром типу Ю-117. Напругу контролювати мультиметром типу MastechM890G.

У результаті проведених експериментальних досліджень ми отримали показники напруги на клеммах зразків 1, 2, 3 та 4 при навантаженні опору.

Таблиця 4.1 – Параметри сонячних елементів при освітленні 10 000

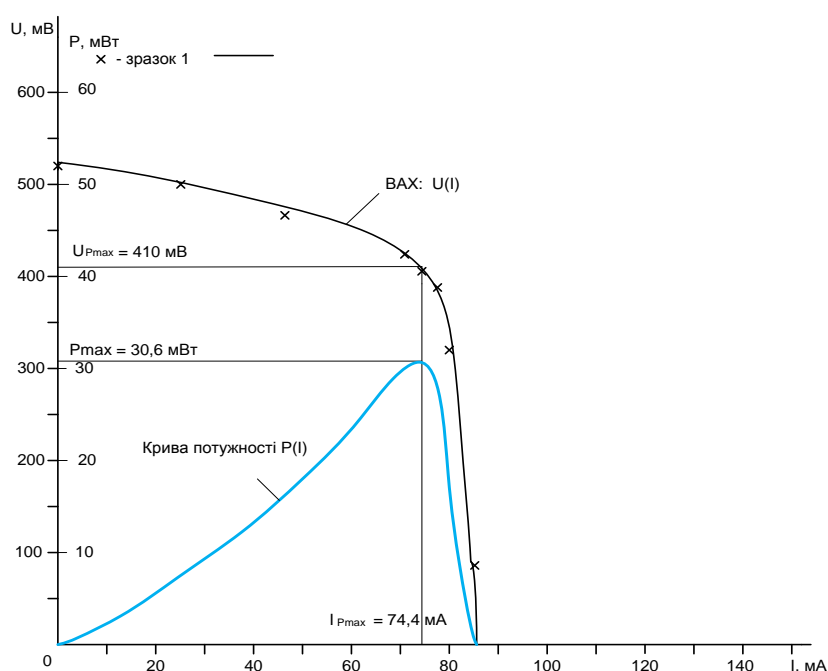
люкс

R	U	I	P	U	I	P	U	I	P	
,Ом	1, мВ	1, мА	1, мВт	2, мВ	2, мА	2, мВт	3, мВ	3, мА	3, мВт	4 м

∞	5 23	0	0	5 10	0	0	5 07	0	0	3
4 0	5 15	1 2,9	6 ,6	5 01	1 2,5	6 ,25	5 00	1 2,5	6 ,25	2
2 0	5 00	2 5	1 2,5	4 92	2 4,6	1 2,1	4 94	2 4,7	1 2,2	2
1 0	4 68	4 6,8	2 1,9	4 68	4 6,8	2 1,9	4 77	4 7,7	2 2,75	0
6	4 25	7 0,8	3 0,0	4 43	7 3,8	3 2,7	4 58	7 6,3	3 5,0	7
5 ,5	4 10	7 4,55	3 0,6	4 34	7 8,9	3 4,2	4 56	8 3,9	3 7,8	6
5	3 87	7 7,4	3 0,0	4 17	8 3,4	3 4,8	4 50	9 0	4 0,5	5
4 ,5	3 58	7 9,5	2 8,5	3 97	8 8,2	3 5,0	4 46	9 9,1	4 4,2	3
4	3 20	8 0	2 5,6	3 72	9 3	3 4,6	4 36	1 09	4 7,5	2
3 ,5	2 82	8 0	2 2,4	3 46	9 8,8	3 4,2	3 98	1 13,7	4 5,3	0
3	2 41	8 0,3	1 9,6	3 16	1 05,3	3 3,3	3 58	1 19,3	4 2,7	5
2 ,5	2 03	8 1,2	1 6,5	2 80	1 12	3 1,3	3 03	1 21	3 6,7	1
2	1 65	8 2,5	1 3,6	2 36	1 18	2 7,8	2 42	1 21	2 9,3	6
1 ,5	1 28	8 5	1 0,9	1 86	1 24	2 3	1 83	1 22	2 2,3	1
		8	7	1	1	1	1	1	1	

1	85	5	,2	24	24	5,4	23	23	5,1	4
0		8	3		1	7		1	7	
,5	43	6	,7	63	26	,9	62	24	,7	7

За результатами побудовано воль-амперні характеристики, що наведено на рисунку нижче. На ньому представлено криву потужності з зазначенням максимальної потужності P_{\max} .



- Рис. 4.1 – ВАХ та крива потужності СЕ №1

Відомо, що необхідно при проведенні вимірювання вольт-амперної характеристики сонячних елементів контролювати показники потужності, а особливої уваги потребують її пікової показники, для нашого дослідження було отримано наступні значення у 410 мВ.

Також хочемо нагадати, що необхідно контролюватиме й такий параметр як опір шунтування, що є важливим параметром сонячного елементу батареї, розмірність його дорівнює показнику темнового струму.

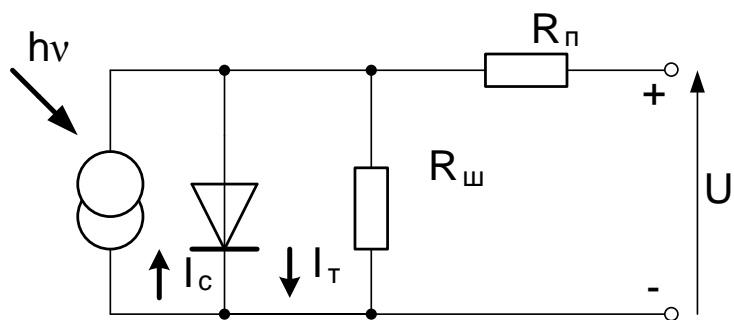


Рисунок 4.2 – Еквівалентна схема сонячного елементу

Як ми вже зазначали при підготовці магістерської дисертації було отримано експериментальні дані, тому наведемо їх результати й графічні залежності, що також побудовано за отриманими значеннями. Їх наведено на рисунках нижче.

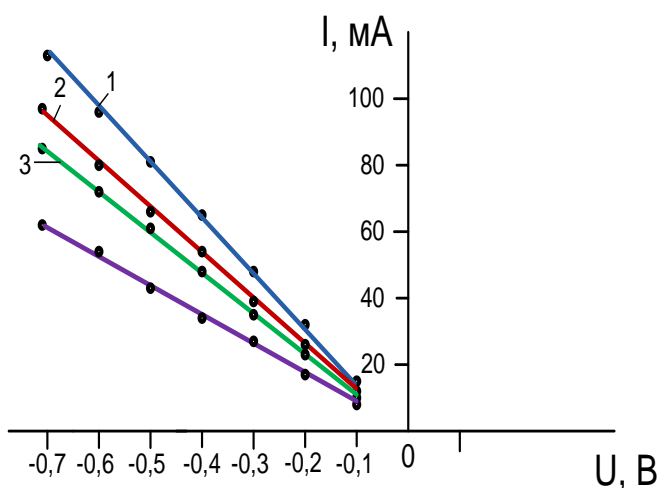


Рисунок 4.2 – ВАХ (темновий струм) перший зразок

Ділянка, що позначена 1, відповідає вимірюванню характеристики при умові короткого замкнення. Ділянка 2, відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у один ом, ділянка 3 відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у п'ять ом.

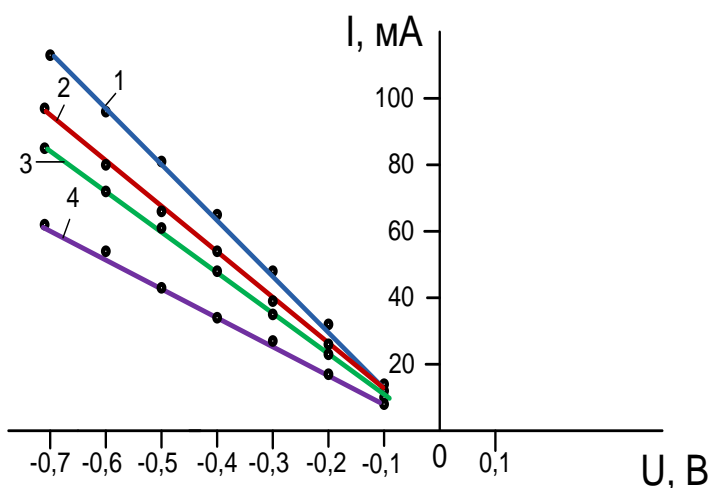


Рисунок 4.3 – ВАХ (темновий струм) другий зразок

Ділянка, що позначена 1, відповідає вимірюванню характеристики при умові короткого замкнення. Ділянка 2, відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у один ом, ділянка 3 відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у два оми, ділянка 4 відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у п'ять ом.

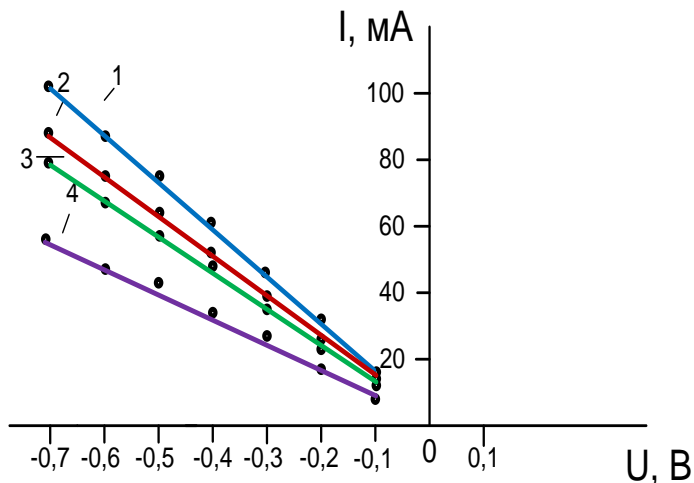


Рисунок 4.4 – ВАХ (темновий струм) третій зразок

Ділянка, що позначена 1, відповідає вимірюванню характеристики при умові короткого замкнення. Ділянка 2, відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у один ом, ділянка 3 відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у два оми, ділянка 4 відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у п'ять ом.

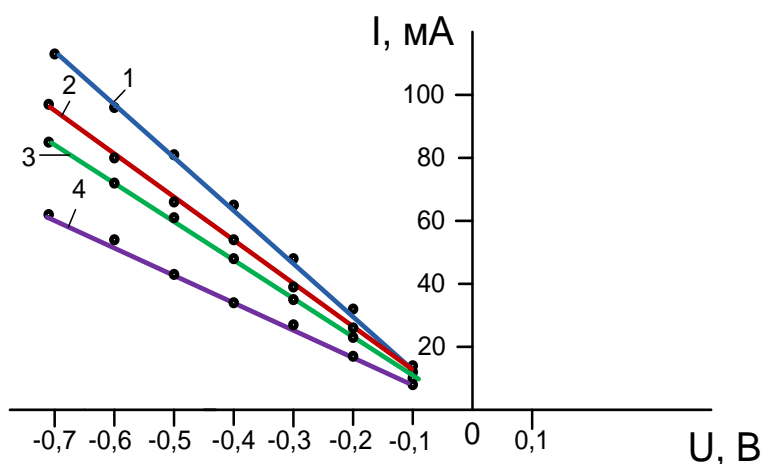


Рисунок 4.5 – ВАХ (темновий струм) четвертий зразок

Ділянка, що позначена 1, відповідає вимірюванню характеристики при умові короткого замкнення. Ділянка 2, відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у один ом, ділянка 3 відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у два оми, ділянка 4 відповідає вимірюванню характеристики при умові підключення до опору у п'ять ом.

За отриманими результатами вольт-амперних характеристик чотирьох зразків сонячних елементів фотоелектричних сонячних батарей, можемо зробити наступні заключення, а саме, перший, другий, четвертий зразки показали приблизно однаковий показник опору шунту, а от третій зразок показав найкращій показник опору шунту у порівнянні з іншими зразками на дванадцять відсотків.

Визначення ВАХ інтегрованою системою

У магістерській дисертації було проведено експериментальні дослідження інтегрованою системою для тих само чотирьох зразків сонячних елементів, що у попередньому дослідженні, результати яких наведено у підрозділі вище. Отримані ВАХ наведені на рисунках нижче.

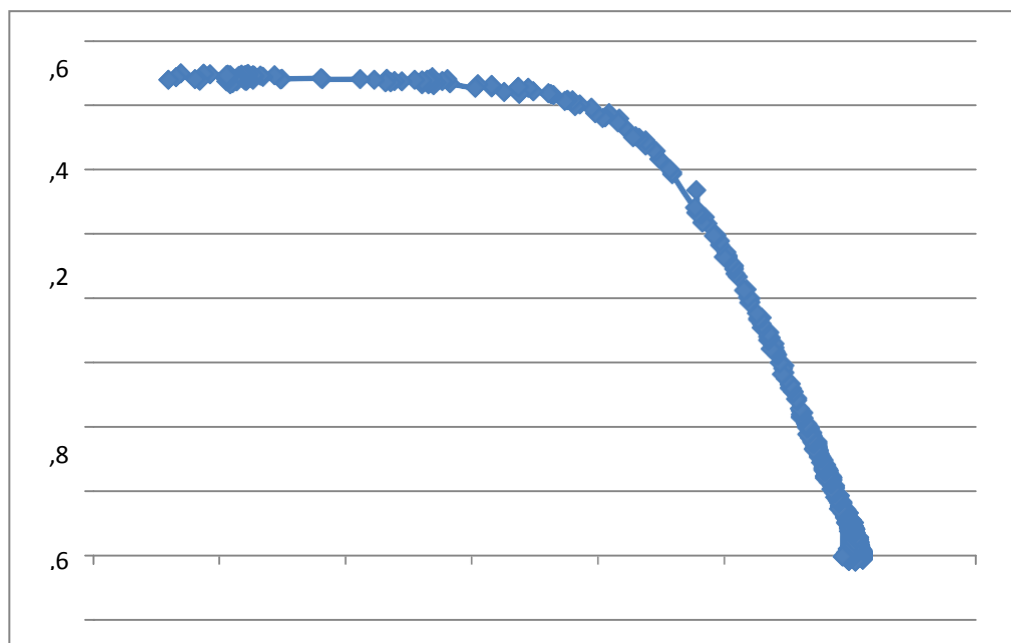


Рисунок 4.6 – ВАХ першого зразка

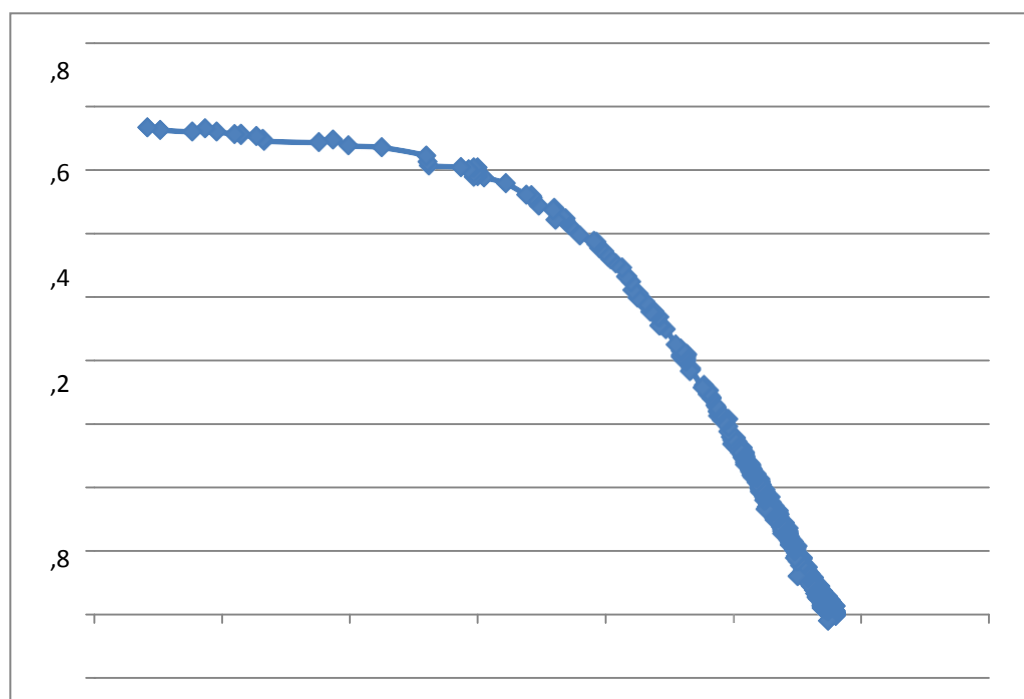


Рисунок 4.7 – ВАХ другого зразка

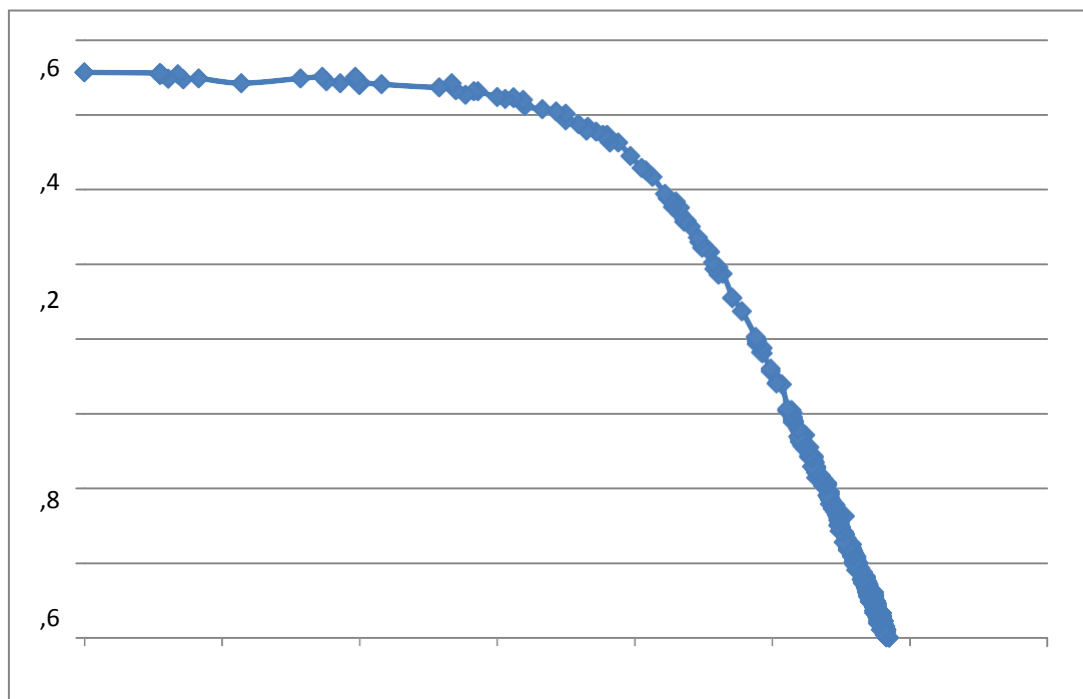


Рисунок 4.8 – ВАХ третьего зразка

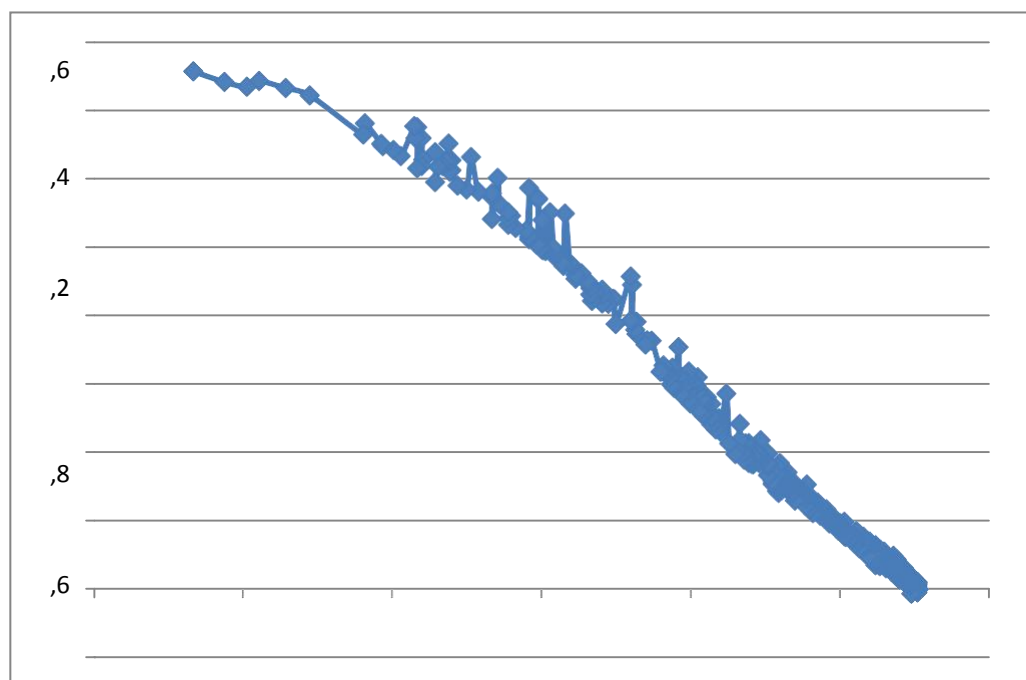
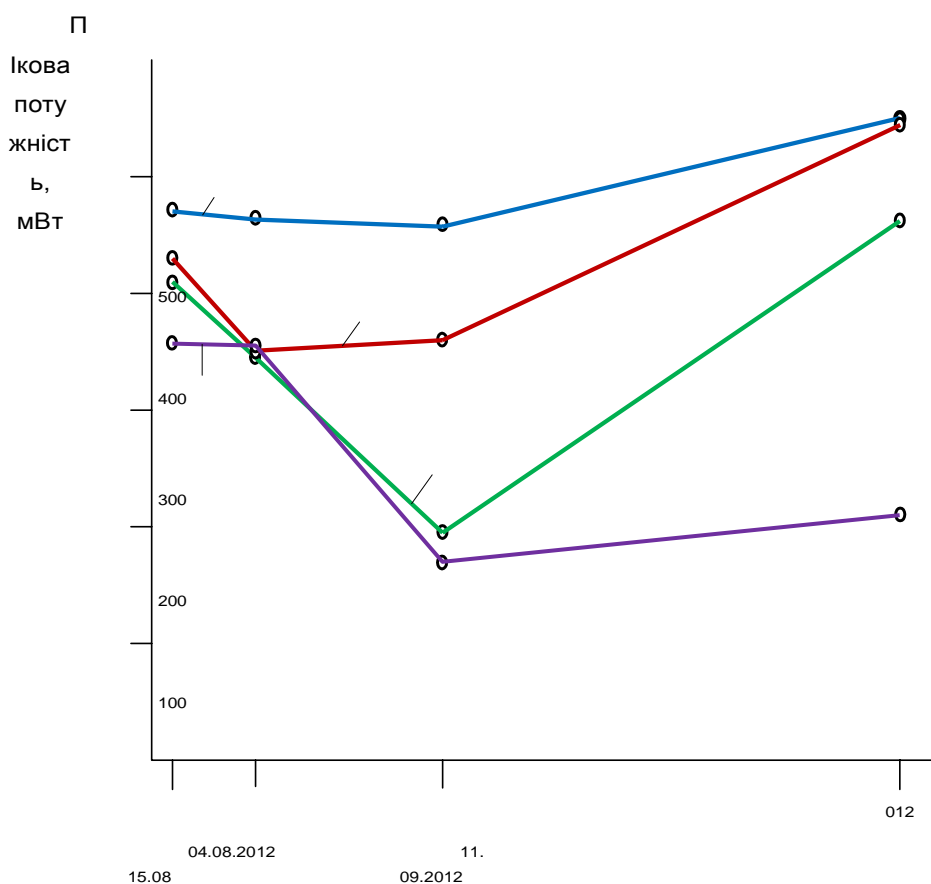


Рисунок 4.9 – ВАХ четвертого зразка

За графічними залежностями струму від напруги для сонячних елементів видно, що четвертому зразку притаманні велика деградація і це значно відрізняє його від першого, другого та третього зразків показником максимальної потужності. Тобто іншими словами можна сказати, що за піковим показником потужності сонячного елемента визначають і корисну дію елемента, тобто коефіцієнт. А у нашому випадку він є найменшим для четвертого зразку.

У ході експериментальних досліджень ми отримали масив даних, що дозволив побудувати графічну залежність пікової потужності майже чотиримісячний період.



Д

а
т
а

1

5
.
1
1
.
2

Рис. 4.10 – Залежності пікової потужності для чотирьох зразків, що досліджувались

На зображенні 4.10 показано, що зразок №4 деградує при зберіганні і саме тому його потужність впала у два рази.

Вимірювання ВАХ з застосуванням лінійної розгортки струму

Під час експлуатаційного терміну кожна фотоелектрична сонячна батарея потребує оптимізації показників потужності навантаження з показниками потужності на виході сонячної батареї. Тому було проведено експериментальне дослідження на сонячній батареї з технічними параметрами струм короткого замикання дорівнює 0,57ампер, напруга холостого ходу дорівнює 21,3 вольт, частота дорівнює 2,718кілогерц, індуктивність дорівнює 65,59 мікрогенрі.

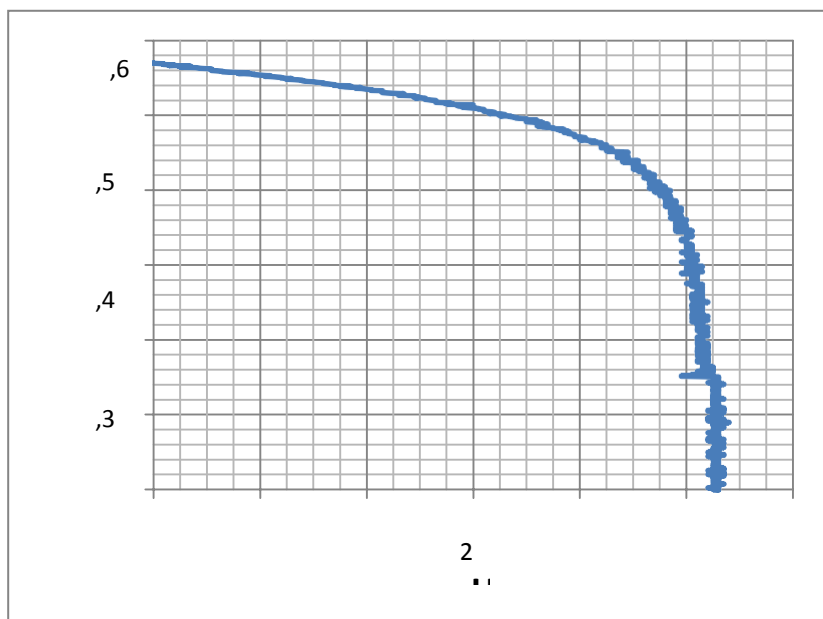


Рисунок 4.11 - ВАХ фотоелектричної сонячної батареї

За умови того, що ми маємо всі параметри, можемо розрахувати фактор заповнення. Після нескладних розрахунків, отримали, що фактор заповнення дорівнює 66%. А це є допустимим показником ФЕСБ, що виготовлена із пластин монокристалічного кремнію .

При проведенні другого експериментального дослідження ми скористаємось такою ж сонячною батареєю, проте показник індуктивності дорівнює 26,36 мікрогенрі. Результат експериментального дослідження наведено на рисунку нижче

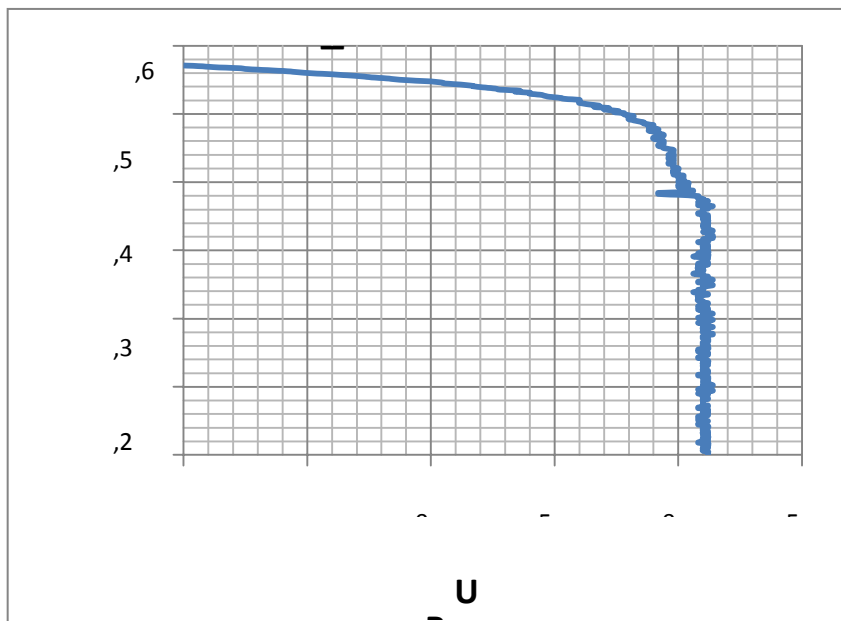


Рисунок 4.14 - ВАХ фотоелектричної сонячної батареї

З отриманого графічного зображення залежності струму від напруги видно, що максимальний показник напруги дорівнює 9,17 ват.

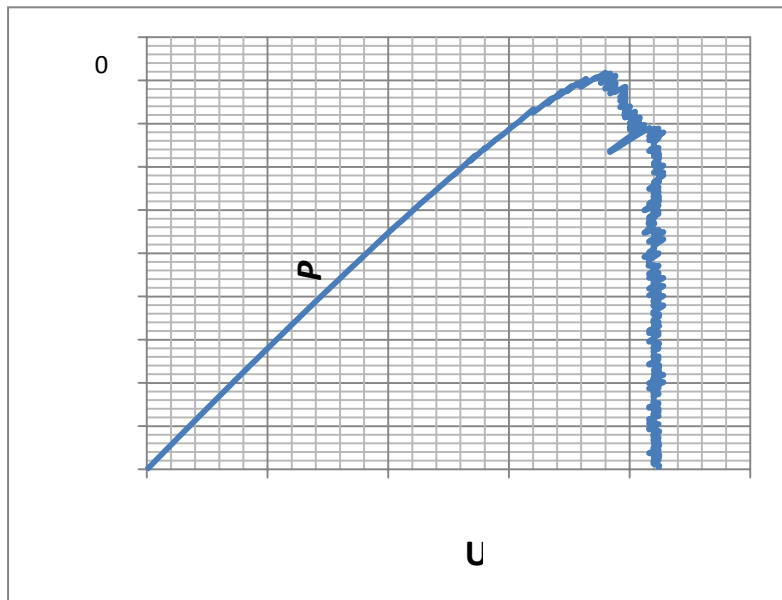


Рисунок 4.14 - ВАХ фотоелектричної сонячної батареї

З отриманих результатів можемо зробити висновок, щоб усунути вплив вимірювального кола на показники дослідження необхідно знижувати індуктивність.

Експериментальним шляхом ми знайшли величини для котушок індуктивності пристрою для лінійної розгортки струму в діапазоні 4-100 мкГн. Розраховано показник частоти і шпаруватість імпульсів розгортки. Отримано результатами вольт-амперних характеристик зразків сонячних елементів фотоелектричних сонячних батарей. З'ясовано, що результати вимірювань однакові при умові однакових показників струму короткого замикання. Це пояснюється різницею спектральних характеристик Сонця та експериментального джерела.

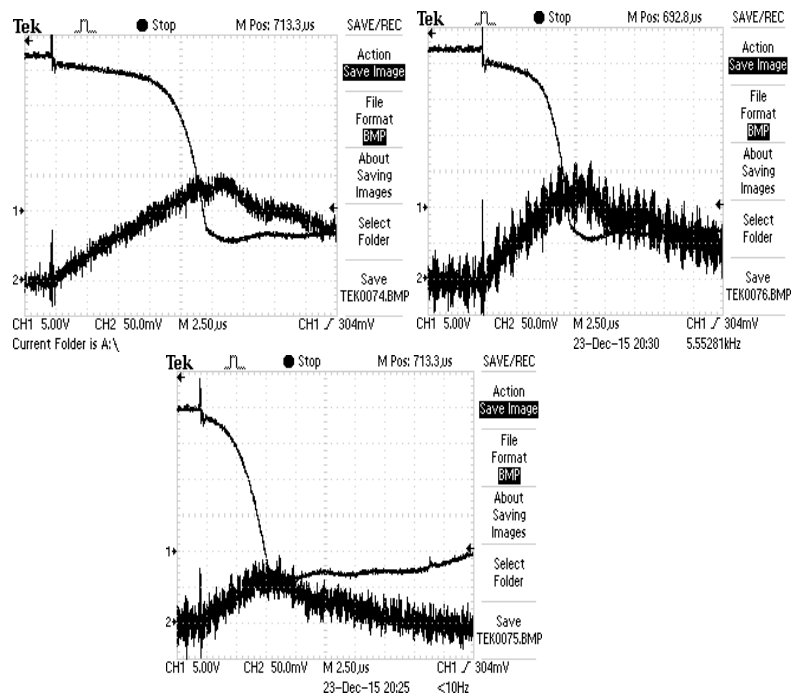


Рисунок 4.15 Результати досліджень – отримані ВАХ

а) без затінення; б) з затіненням; в) з затіненням одного сегменту

З наведених графічних залежностей, що отримані за різних умов було отримано результат: при повному затіненні показник максимальної потужності знижується до тридцяти раз, за умови затіненні одного сегменту батареї, що дорівнює половині поверхні корисна дія знижується у два рази.

- Розрахунок похибок вимірювання ВАХ з застосуванням лінійної розгортки струму
- Хочемо звернути увагу на основні вузли експериментального устаткування з використанням якого проводились дослідження вольт-амперних характеристик фотоелектричних сонячних батарей, а саме:
 - нелінійність вихідного опору ключа транзистору;
 - наявність вихідної ємності ключа транзистору;
 - похибка АЦП осцилографу.

Розпочнемо з огляду впливу джерел при послідовному впливі. Значення граничної відносної похибки вимірювання дорівнює:

$$\delta_{\text{Ркл}} = (0,011/10) \cdot 100\% = 0,11\% .$$

Для аналітичного дослідження впливу відносної похибки розглянемо схематичне рішення лінійної розгортки струму, що наведено на рисунку нижче.

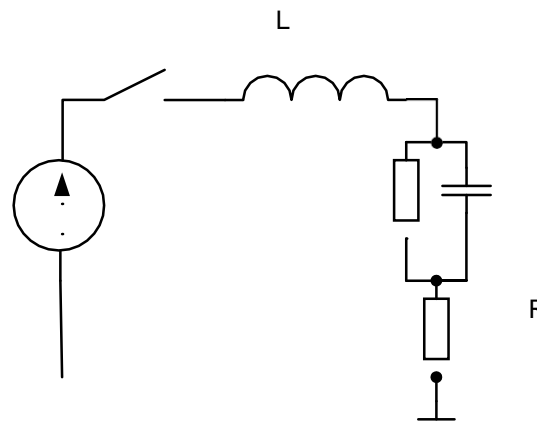


Рис. 4.20 – Схематичне рішення лінійної розгортки струму

Розрахуємо час, протягом якого, триває перехідний процес на ємності транзисторного ключа. Хочемо зауважити, що існує поняття сталої перехідного процесу і для нашого випадку він дорівнює:

$$\eta_2 = 141,933 \cdot 10^{-6} \text{ с} .$$

Значення відносної похибки, джерелом виникнення якої є вихідна ємність транзисторного ключа, визначається за формулою наведеною нижче:

$$\delta_{\text{кл}} = ((\eta_2 - \eta) / \eta) \cdot 100\% = 0,025\% .$$

Значення відносної похибки, джерелом виникнення якої є осцилограф, визначається за формулою наведеною нижче:

$$\delta = 0,5 \cdot 2^{-8} \cdot 100\% = 0,2\% .$$

Отримані результати дозволяють стверджувати, що методичну похибку зменшено в шість раз. А нелінійність розгортки струму дорівнює показнику:

$$\delta_{\text{нел}} = 0,24 \% .$$

Оцінка вирогідності контролю дефектів

Оцінка результатів вимірювань експериментальних досліджень з фотоелектричними сонячними батареями можлива при порівнянні з еталонними показниками. Нами експериментальним шляхом (за умов потужності у 30 ват, при напрузі холостого ходу у 22 вольти та струмі замикання у 1 ампер) виявлено, що розподіл показників вихідної потужності, що визначено експериментально, відповідає критерію χ^2 Пірсона [153].

Отримані результати наведено на рисунку нижче

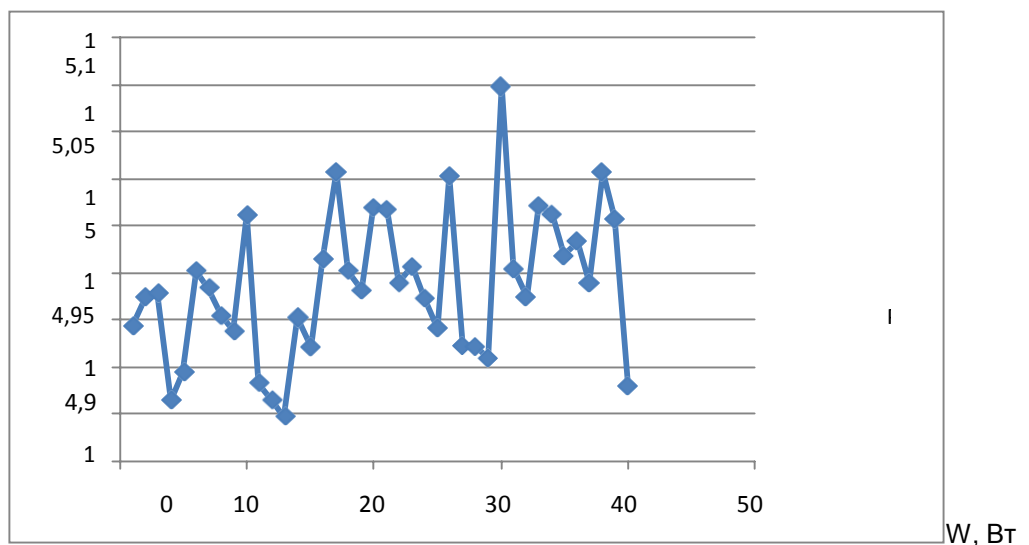


Рисунок 4.21 – Графік залежності кількості вимірювань від вихідної потужності

При незмінній енергетичній освітленості дійсне значення максимальної вихідної потужності ФЕСБ $W = 14,8$ ват. Було зображено графік у вигляді гістограми частот значень W .

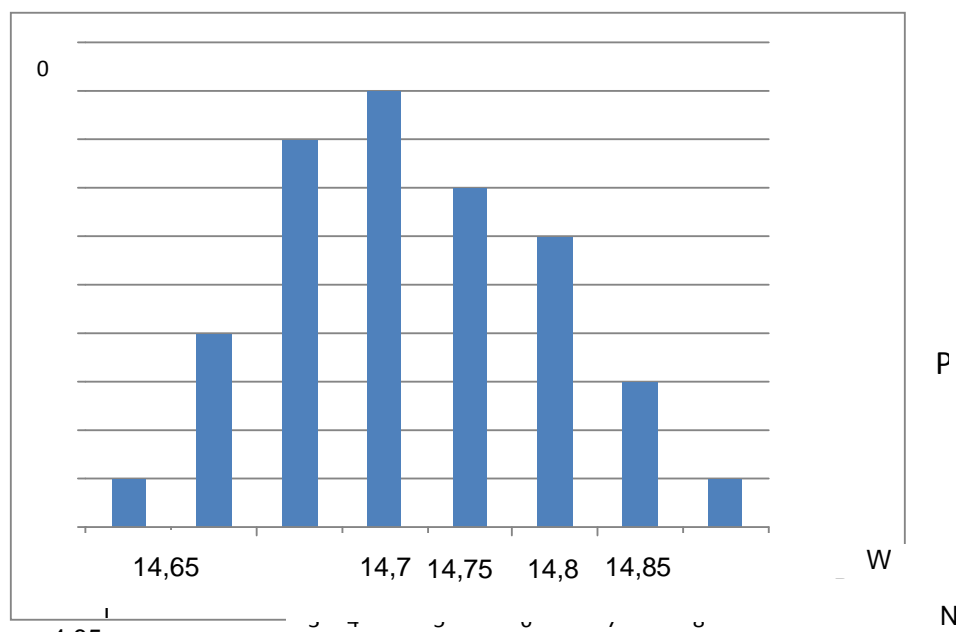


Рисунок 4.22 – Гістограма частот значень максимальної вихідної потужності ФЕСБ

Середнє значення максимальної потужності батареї дорівнює 14,84 ват, його графічне зображення наведено на рисунку нижче.

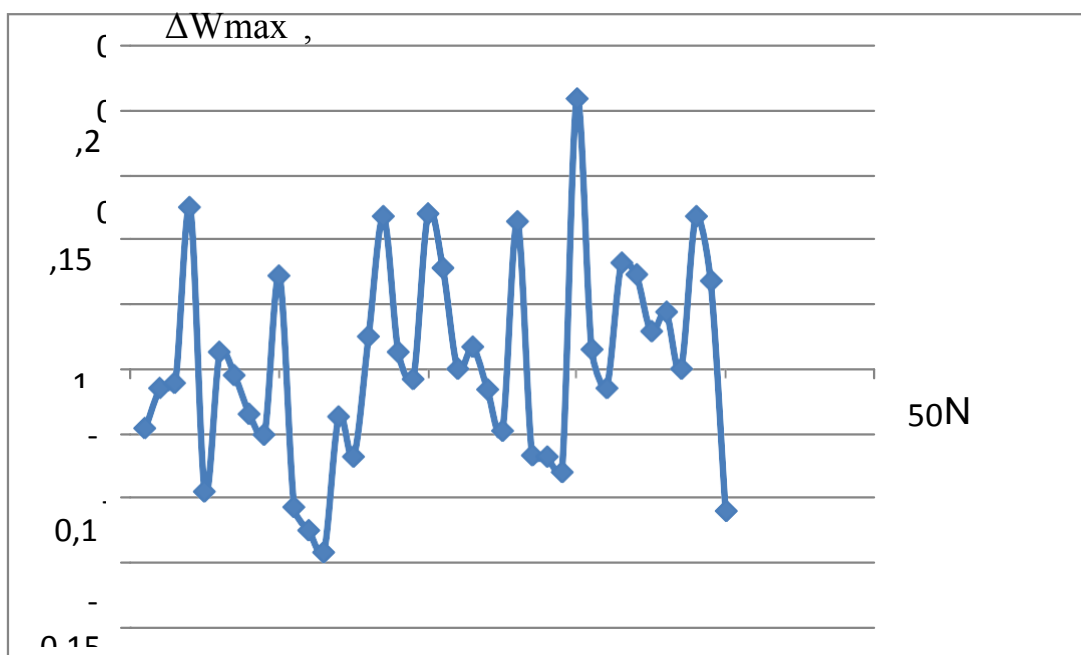


Рисунок 4.23 – Графік залежності потужності від середнього значення потужності

Середнє квадратичне відхилення (СКВ) значення максимальної потужності ФЕСБ $\zeta_w = 0,013 \text{ Вт}$.

СКВ похибки вимірювання $\zeta_{\Delta W} = 0,012 \text{ Вт}$ при $\Delta W_{\text{сер}} = 0,01 \text{ Вт}$.

Гістограму частот ймовірностей значень похибок вимірювання максимальної потужності ФЕСБ наведено на рисунку 4.24.

Значення максимальної вихідної потужності сонячної батареї та похибок вимірювання розподілені за нормальним законом і описуються рівняннями [153]:

$$f(W) = (\sqrt{2\pi}\sigma_w)^{-1} \exp(-(W - W_{\text{сер}})^2 / 2\sigma_w^2); \quad (4.9)$$

$$y(\Delta W) = (\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta W})^{-1} \exp(-(\Delta W - \Delta W_{\text{сер}})^2 / 2\sigma_{\Delta W}^2); \quad (4.10)$$

де σ_w , $\sigma_{\Delta W}$ – СКВ максимальної вихідної потужності ФЕСБ та похибки її визначення.

Границі допуску вихідної потужності обмежені 5% відхилення від номінального показника. Підставляючи задані значення у рівняння (4.7) та (4.8) та застосувавши відомі таблиці інтегралу ймовірностей (х) [151], визначимо значення $\alpha = 0,0295$ та $\beta = 0,0153$.

Контроль дефектів фотоелектричних сонячних батарей методом інфрачервоної термографії

Оскільки в основу інфрачервоної термографії закладено процес візуалізації місць дефектів сонячних елементів батарей у вигляді термографічної карти (зображення), тому можемо зазначити, що за нерівномірний розподіл температури свідчить про дефект. Такі місця дефектів мають більшу температуру у порівнянні з всією площиною сонячного елементу. Науковці зосередили свої дослідження у напрямку визначення вольт-амперних характеристик місць дефектів сонячних елементів. За результатами експериментальних досліджень ВАХ вчені визначають коефіцієнт прямокутності або його ще називають коефіцієнт форми ВАХ.

Його зменшення дозволяє стверджувати зниження коефіцієнту корисної дії сонячної батареї. Хоча такий спосіб визначення робочої здатності панелі є досить простим, проте, він не є ефективним, адже сонячна батарея складається майже з 40 елементів і їх дослідження в такий спосіб буде вкрай довгим по часу. Також є певні особливості дослідження всіх елементів панелі через послідовне з'єднання, що унеможлиблює досліднику здатність задавати й вимірювати напругу на окремих елементах сонячних елементів батарей.

Хочемо зазначити, що при зворотному підключенні сонячного елемента, струм буде проходити скрізь шунтовий опір. У випадку присутності дефектів у вигляді електричних пробоїв на поверхні сонячних елементів формуються місця локального перегріву.

Експериментальним шляхом нами отримано термічне зображення Се за умови - напруга живлення дорівнює -20 В (рис. 4.15). Як видно з термічного зображення сонячного елементу, температура дефекту має більший показник, приблизно на 19 С у порівнянні з температурою поверхні сонячного елемента ніж середня температура поверхні елемента (46.С).

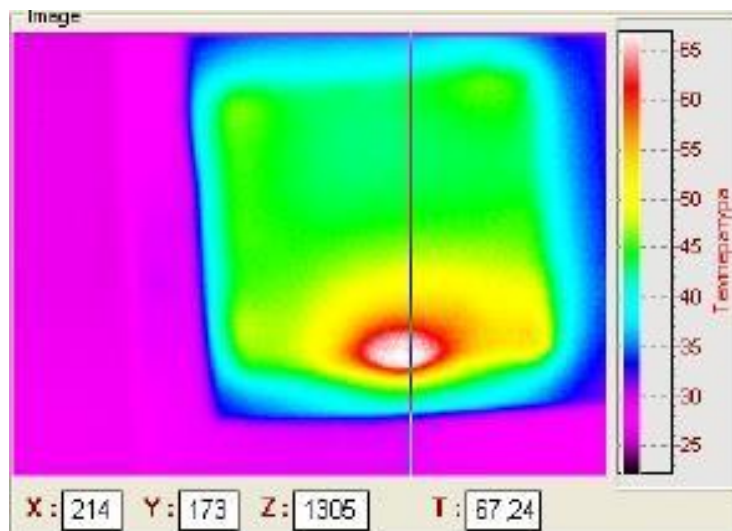


Рисунок 4.15 – Термограма

У випадку, коли додатковою складовою конструкції сонячної батареї є скло, відбувається збільшення осередків нагрівання, що ускладнює роботу щодо визначення кількості дефектів. При проведенні експериментальних досліджень по отриманню термографічного зображення площини сонячної батареї проводиться під напругою у 1000 В. Під час проведення таких експериментальних досліджень отримано термограми (рис. 4.15) та (рис. 4.16) кремнієвих ФЕСБ.

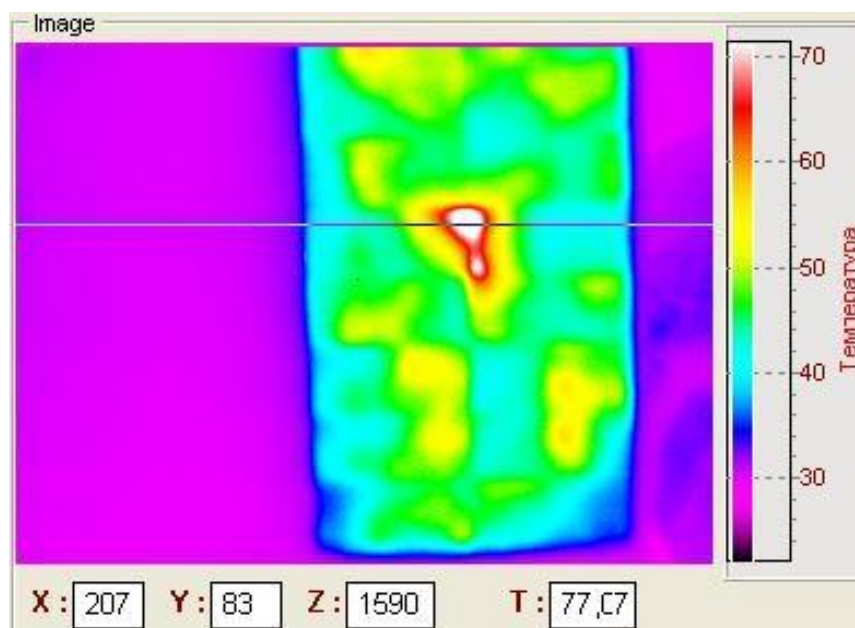


Рисунок 4.16 – Термограма

На термографічному зображенні, що наведено на рисунку присутня біла пляма дефекту сонячного елемента. Градієнт температури в цьому дефектному місці дорівнює 2 градус/піксель. Виявлення дефекту робить неможливим PID – тест, що є додатковим дослідженням сонячних елементів. Час проведення такого дослідження дорівнює 48 годин безперервної роботи з підключенням до зворотної напруги. Результати такого експериментального дослідження дозволяють визначити чи може продовжуватись експлуатація сонячної батареї. Умовою для продовження експлуатації є зниження коефіцієнту корисної дії сонячної батареї до 15 відсотків. Якщо ж коефіцієнт корисної дії перевищує 15 відсотків, тоді така сонячна панель має бути утилізована.

Тому вважаємо, що використання методу інфрачервоної термографії з застосуванням зворотного темнового струму при нагріванні можна використовувати для оцінки технічного стану сонячних елементів.

Розрахунок теплової потужності дефекту фотоелектричної сонячної батареї

Методика оцінки якості технічного стану сонячної батареї шляхом пропускання зворотного темнового струму має місце при виконанні вихідного контролю СЕ на процесі виготовлення в умовах виготовлення. Така методика дослідження отримала назву PID (Power induced Test) .

Під час виконання експериментальних досліджень [155] ми відтворили умови проведення PID тесту для сонячних батарей для того, щоб визначити дефекти за локальними неоднорідностями температурних полів на площі панелі. На зображенні 4.17 ми представили термографічне дослідження СЕ. Таке дослідження ми проводили для панелі з потужністю 60 Вт.

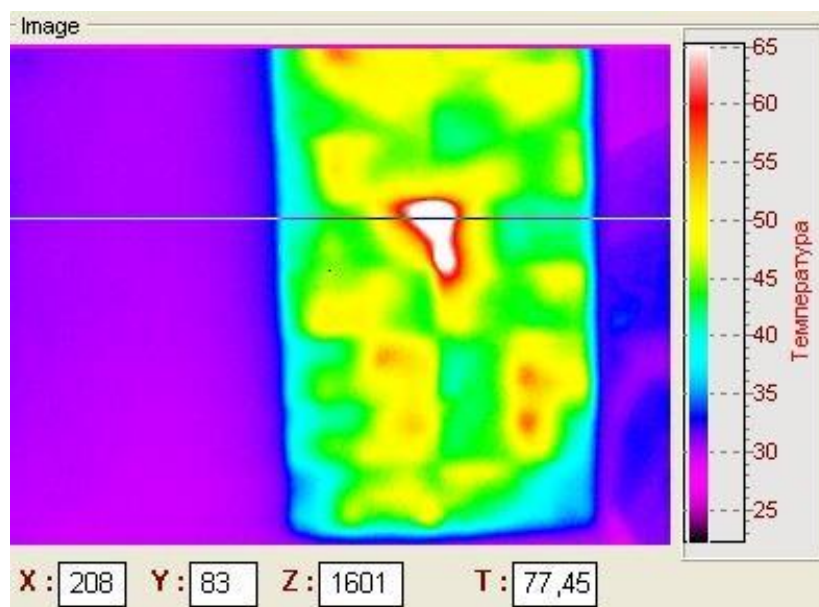


Рис. 4.17 – Термографічне зображення СЕ з кремнію; потужністю 60 Вт.

При використанні програмного забезпечення Teplovisio визначено роздільну здатність термографу. Ширина нагрітої частини батареї дорівнює 305 міліметри. Таким чином, один піксель відтворює квадрат з геометричними розмірами 3мм x 3 мм.

Попіксельна обробка отриманого зображення проведена у програмному забезпеченні Paint.Net наведена нижче на рисунку. За її результатами встановлено, що дефект має складну структуру і складається з двох зон.

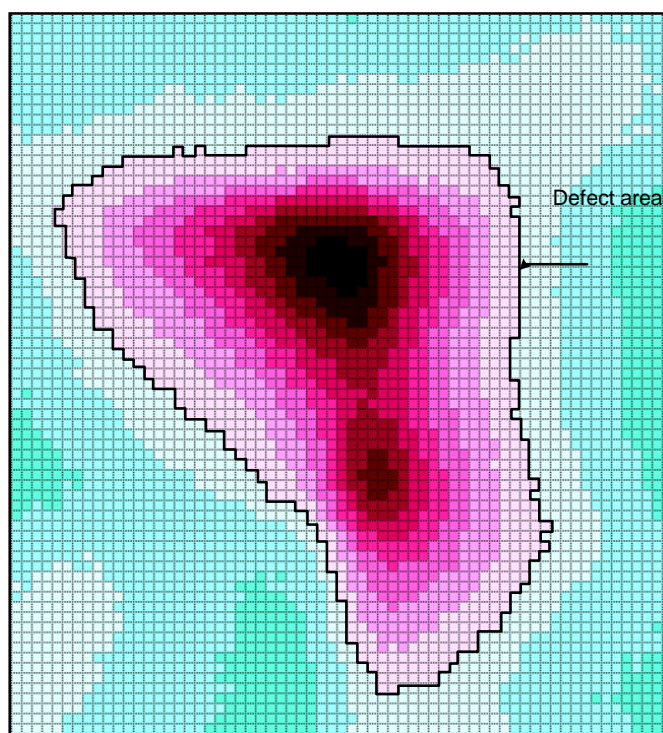


Рис. 4.18 – Графічне зображення зони дефекту сонячного елементу: x800

Зони дефектів відсортовано за показниками температури та згруповано у таблиці, для структуризації результату вимірювання. Ці показники було обраховані з застосуванням спеціально розробленого програмного забезпечення.

Таблиця 4.1 – Структура пікселів за показником температури при визначенні дефектів (від білого(1) до чорного(9))

Зона	1	2	3	4	5	6	7	8	9
температура, К	33 0,5	34 2	33 4	33 8	34 1	34 4	34 7	3 50	353
Кількість	56 0	24 7	30 1	18 7	13 9	10 2	65	2 2	48

Розрахуємо прикладену електричну потужність, за формулою наведеною нижче:

$$P = 670 \text{ В} \cdot 0,17 \text{ А} = 114 \text{ Вт}.$$

Площа S нагрітої частини сонячних елементів батареї у розрахунку дорівнює половині всієї поверхні:

$$S = 61 \cdot 30,5 = 1860,5 \text{ см}^2.$$

Середнє значення розрахованої густини теплового потоку ФЕСБ дорівнює $\rho = P/S = 61,2 \text{ мВт/см}^2$. Формула для визначення конвекційної компоненти наведена нижче.

Радіаційна компонента [156] дорівнює:

$$q = \sigma S \varepsilon (T^4 - T^4), \quad (4.12)$$

де $\zeta = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – стала Стефана-Больцмана; ε – коефіцієнт чорноти скла; $\varepsilon = 0,937$ [131].

Загальну потужність дефекту виразимо як суму елементарних дефектів, що мають розмір одного пікселя та забезпечуючи конвекційний та радіаційний механізми теплообміну з оточуючим середовищем. Площа пікселю $S = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Загальний тепловий потік зони дефекту це інтегральна сума теплових потоків, що становить:

$$P_d = 1220 \text{ мВт.}$$

Ми повинні помножити цей показник на два та отримати загальне значення, адже у попередній формулі враховується одна сторона, після цих перетворень отримуємо:

$$P_d^{\text{full}} = 2440 \text{ мВт.}$$

Конвекційна компонента теплового потоку ФЕСБ дорівнює $Q_c = 5 \cdot 0,186 \cdot (320 - 293) = 25,1 \text{ Вт.}$

Радіаційна компонента визначається за формулою наведеною нижче

$$q = \sigma S \varepsilon (T^4 - T_0^4)$$

$$q_r = 30,8 \text{ Вт.}$$

Тоді загальний тепловий потік сонячної батареї можемо розрахувати за формулою: $Q = 2(25,1 + 30,8) = 111,8 \text{ Вт.}$

Цей показник у 111,8 Вт майже дорівнює показнику прикладеної електричної потужності, яка рівна 114 Вт. При врахуванні цих показників маємо розмір відносної похибки у 1,9 %.

Дефекти сонячних елементів малих навіть дуже малих розмірів розміру можуть мати в зоні дефекту величезний перегрів. Це пов'язано не тільки з площиною дефекту, а і з глибиною дефекту сонячного елементу. Такі перегріви перевищують показник нагрівання цілого елементу у два рази.

Телевізійний контроль електролюмінісцентних дефектів фото-електричних сонячних батарей

Електролюмінісценція дефектів кремнієвих панелей батарей покладено у основу методу їх візуалізації. Виявлення цих дефектів можливе шляхом формування паразитних світлодіодних структур на фосфіді алюмінію через недоліки технології. От наприклад, є особливість виникнення електролюмінісценції на сонячній батареї, вона виникає при прикладанні до елементу зворотної напруги.

Експериментальні дослідження, що нами проведено, дозволили нам отримати інформацію про місця дефектів, температури перегріву у місцях дефектів та дослідження ВАХ.

При використанні під час досліджень каскадного джерела живлення 1000 В, 400 Вт нами був спроектований лабораторний стенд для реалізації телевізійного контролю ФЕСБ. Похибка визначення координати дефекту не перевищує 5 мікрон (5 мікрон/піксель).



Рисунок 4.17 – Стенд для телевізійного контролю електролюмінесценції сонячних елементів

На зображенні 4.17 представлено фото експериментального стенду. Конструкція кронштейну з сонячними елементами батареї зафіксовано жорстко на оптичній лаві. Потужність сонячних елементів, що використовували для дослідження дорівнює 3 Вт.

При значному скупченні дефектів у одній зоні, виникають складнощі щодо їх виокремлення та визначення температури перегріву. Не можемо такого сказати про масові скупчення дефектів у одній зоні сонячного елемента, адже таке розташування призводить до складності вимірювання через великий перепад температури у зоні дефекту й неущожденою площиною сонячного елемента батареї.

Ми вважаємо, що контроль дефектів елементів має проводитись весь її час експлуатації – від виробництва до утилізації.

Експериментально отримано результати дослідження залежності яскравості ЕЛД від напруги та й визначено її форму, що можемо описати рівнянням $A \sim \exp(-c/\sqrt{U})$. Нами визначено обмеження щодо придатності в експлуатації сонячних бетарей в залежності від кількості ЕЛД. Хочемо зазначити, що робота вважається допустимою при кількості ЕЛД від 1 до 5. Більша кількість або нерівномірний розподіл ЕЛД (рис. 4.18) вказують на невідповідність ЕХ паспорту СЕ.

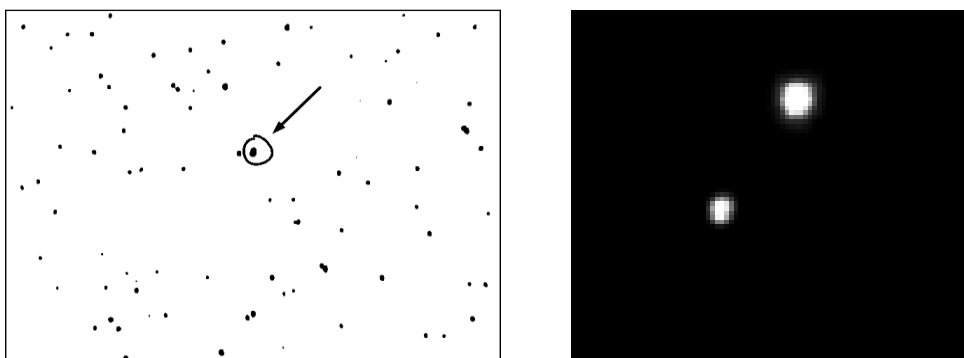


Рисунок 4.18 – Зображення інвертоване сонячного елемента з дефектом

Похибки вимірювання геометричних розмірів дефектів

Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів полягає у визначенні меж електролюмінісценції дефекту сонячного елемента. Визначення координат лівої $\sigma_{\text{л}}$ та правої $\sigma_{\text{п}}$ меж електролюмінісценції дефекту сонячного елемента можна за рівнянням.

Для проведення дослідження щодо внеску складових похибок $\sigma_{\text{ацп}}$ і $\sigma_{\text{м}}$ у результат похибки вимірювання діаметру електролюмінесценції дефекту сонячного елемента врахуємо $\sigma_{\text{ацп}} = \sigma_{\text{м}} = 0,29\Delta_{\text{ріх}}$.

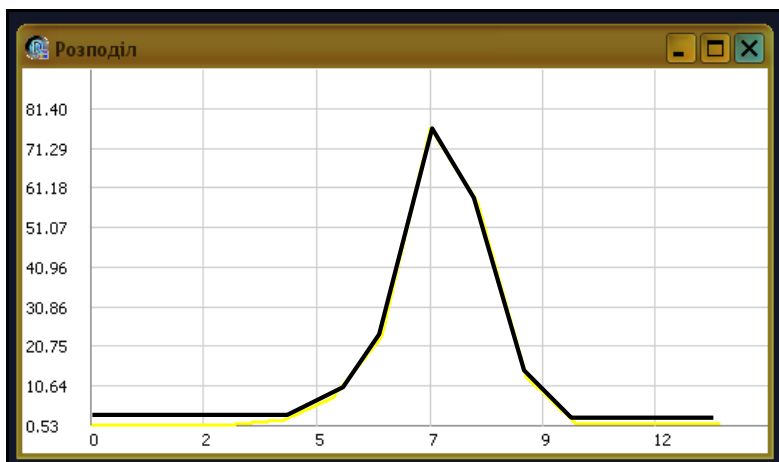


Рисунок 4.19 – Зміни сигналу вимірювальної системи на межах електролюмінесценції дефекту

Наприклад, згідно з базовою методикою встановлено, що зображення лівої межі ЕЛД проходить через піксель з координатами $(i; j)$, а правої — через піксель з координатами $(i; k)$, що показано на рисунку нижче (рис. 4.21).

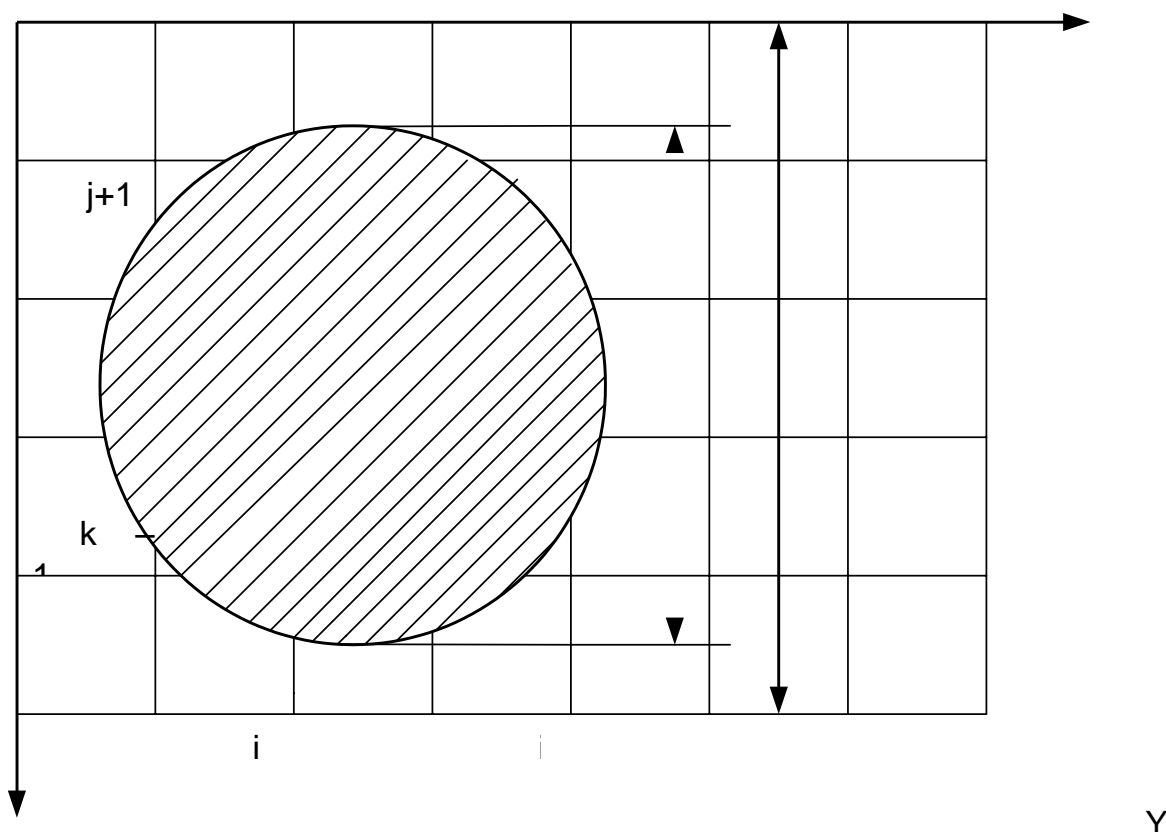


Рис. 4.21 – Схематичне зображення матриці пікселів

При кількості вимірювань, що дорівнює три та масштабі зображення 5 мкм/піксель похибку вимірювання координати електролюмінесценції зменшено з 5 мкм (півпікселя) до 1,7 мкм.

Для отримання темної вольт-фарадної характеристики був розроблений стенд у складі фотоелектричної сонячної батареї (ФЕСБ), лабораторного джерела живлення, генератора імпульсів, потужного ключа MOSFET, джерела живлення генератора імпульсів, котушки індуктивності, двоканального цифрового осцилографа.

На ФЕСБ подають від'ємну (зворотну) напругу від 0 до – 16,6 В. При короткому замиканні ФЕСБ за допомогою ключа MOSFET через послідовно включену котушку індуктивності в колі ФЕСБ виникають затухаючі власні коливання контуру, який утворюють внутрішня ємність ФЕСБ та дана котушка індуктивності (Рис. 2.29).

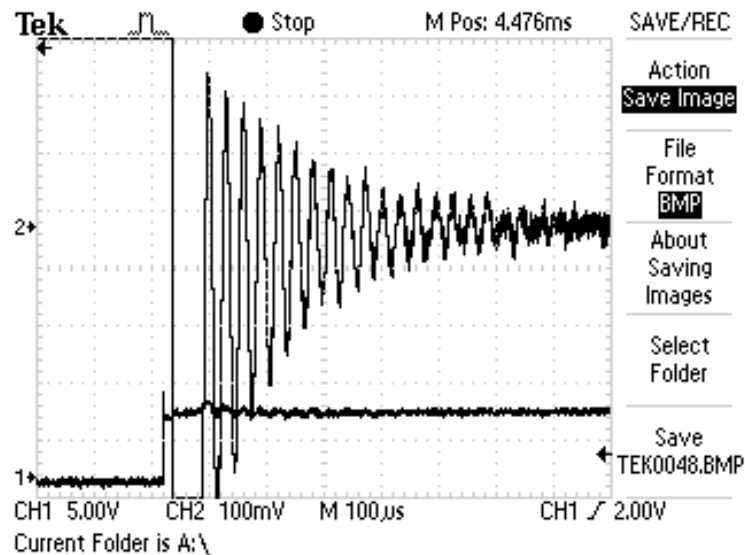


Рис. 2.29 – Власні коливання ФЕСБ потужністю 30 Вт та зовнішньої котушки індуктивності: зворотна напруга $U = -14,1$ В; частота $F = 14,1$ кГц; індуктивність $L = 566$ мкГн

За частотою власних коливань визначають внутрішню ємність ФЕСБ:

$$C = 1/L(2\pi F)^2 \quad (2.12)$$

Для різних значень зворотної напруги отримано темнову вольт-фарадну характеристику ФЕСБ (darkcapacitance-voltagecharacteristic), яка є лінійною із відносною систематичною похибкою $\pm 3\%$ (Рис.2.30). C , нФ

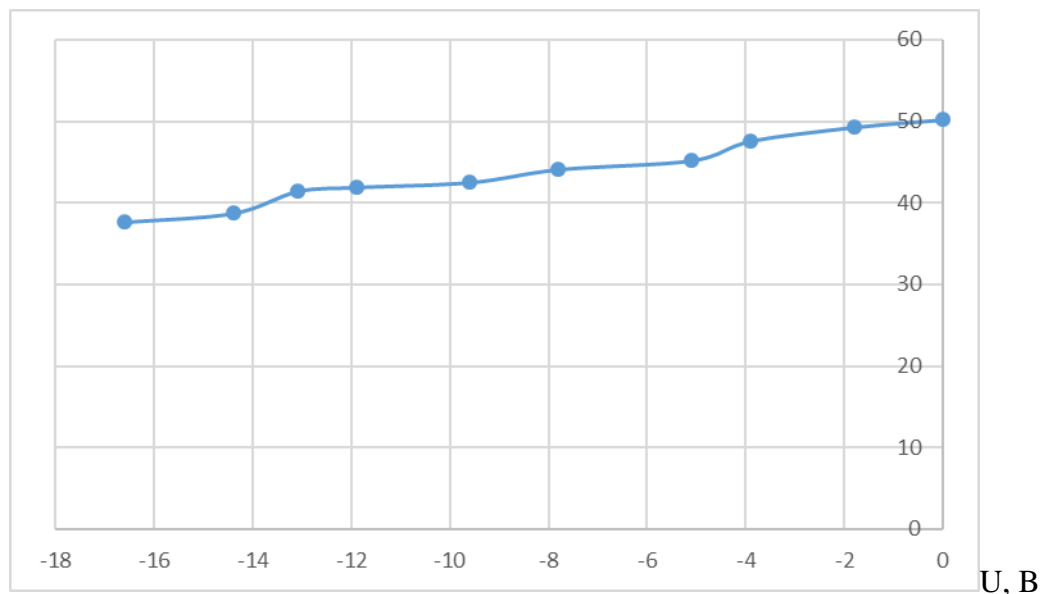


Рис. 2 – Темнова вольт-фарадна характеристика ФЕСБ номінальної потужності 30Вт

Доведено дієвість методу визначення вольт-фарадних характеристик ФЕСБ за частотою вільних коливань в контурі, який утворює електрична ємність сонячної батареї і зовнішня індуктивність. Коливання в контурі збуджують періодичним коротким замиканням контуру через потужний транзисторний ключ.

Розділ 5 Розробка стартап проекту

Стартап - вид малого венчурного підприємництва, фактично являє собою бізнес-ідею, що заснована на інновації або інноваційній технології. Ця ідея ще не використовується на ринку або компанія, що хоче вийти на ринок з цією ідеєю має новий погляд щодо її реалізації, що має суттєві переваги надіснуючими.

5.6 Опис ідеї проекту

У табл. 5.1 поданий зміст ідеї для стартап-проекту із зазначення можливих напрямків застосування та вигодами для потенційного користувача товару.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для Користувача
Надання послуг зі встановлення сонячної батареї з системою Відслідковування положення Сонця чи встановлення такої системи на вже існуючу сонячну батарею	Послуги зі встановлення сонячної батареї	Встановлення сонячної батареї у домогосподарстві, економічно вигіднішого, в порівнянні з іншими
	Послуги модернізації існуючих сонячних Батареї	Можливість збільшення ефективності роботи сонячної батареї

5.7 Технологічний аудит ідеї проекту

У табл. 5.2 наведено аудит технологій, за допомогою яких можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 5.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Встановлення/модернізація сонячної батареї	Встановлення/модернізація сонячної батареї ресурсами власної компанії	Так	Так
2	Встановлення/модернізація сонячної батареї	Встановлення/модернізація сонячної батареї у кооперації з компаніями вже існуючими у цьому сегменті ринку	Так	Так

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: перша, але з можливістю кооперації з іншими компаніями в частині встановлення системи сонячних панелей.

5.8 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей під час впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту.

На табл. 5.3 приведено аналіз попиту для визначення привабливості ринку для входження.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційного ринку стартапу

/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, \$/рік	60 млн. \$/рік
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Швидко зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Обмежена кількість потенційних клієнтів
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	14-17

У таблиці 5.4 визначені потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформовано орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 5.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних Потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Економічна вигідність використанн я систем сонячних панелей	Власники приватних будинків	Різна купівельна спроможність	Гарантійне обслуговування системи

В наступних таблицях (табл. 5.5-5.6) наведено фактори, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та фактори, що йому перешкоджають. Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.5 – Фактори загроз

№ /п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Поява конкурентних Рішень	Поява принципово іншого, ефективнішого методу відслідковування	Розробка аналогічного інструменту для нових типів Пристроїв
2	Зміна ринку	Швидке зростання та прогнозоване витіснення сонячного світла, як джерела енергії, іншим	Поступова версифікація джерел енергії в напрямку ефективніших

Таблиця 5.6 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
	Розширення галузі	Зростання попиту на продукт, зокрема серед власників багатоквартирних будинків	Створення продукту з дружнім до користувача інтерфейсом для можливості власноручного розгортання системи

Далі проводиться аналіз пропозиції (табл. 5.7): визначаються загальні риси конкуренції на ринку

Таблиця 5.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

	характер исти ка	конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: монополія/олігополія/ монополістична/чиста	Чиста	
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/ ...	Локальн ий	Можливість створення компанії міжрегіонального/ національного рівня
3. За галузевою ознакою: міжгалузева/внутрішньог алузева	Міжгалу зева	Можливість співпраці на юридичному рівні для лобіювання законів, що забезпечать конкурентоспроможність з іншими галузями енергетики
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова, товарно-видова, між бажаннями	Товарно- родова	Розширення функціоналу системи
5. За характером конкурентних переваг: цінова/нецінова	Нецінова	
6. За інтенсивністю: марочна/не марочна	Не марочна	Створення впізнаваного бренду
Особливості конкурентного середовища	В чому проявляє ться дана	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути

Детальний аналіз конкуренції в галузі проводиться за моделлю 5 сил М.

Портера і показаний на табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	панелей	Допогосподарствах	для систем або інтернет-майданчики		Знайдено
Висновки	Конкуренція не надто інтенсивна	Є достатньо можливостей для виходу на ринок	Постачальники не диктують умови на ринку	Клієнти мають мінімум вимог	Обмеження через замінників Немає
Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Компанії зі встановлення систем сонячних	Інші компанії, що спеціалізуються на використанні сонячної енергії в	Компанії, що спеціалізуються на постачанні комплектуючих	Приватні домогосподарства	Повноцінні замінників не

Останнім етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 5.9) на основі попередньо визначених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Таблиця 5.9 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: підвищення ефективності звичайної системи сонячних панелей на 30-60%	Слабкі сторони: залежність від правильного проведення інформаційної кампанії серед потенційних клієнтів
Можливості: Вдосконалення системи відслідковування положення Сонця, та збільшення надійності рухових Механізмів	Загрози: освоєння конкурентами аналогічних або ефективніших методів підвищення ефективності роботи сонячних батарей

В табл. 5.10 проаналізовані альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 5.10 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

1	Освоєння альтернативного методу відслідковування положення Сонця, що буде більше економічно вигідним	Така сама, як і в випадку основної ринкової поведінки	Довше, ніж у випадку основної ринкової поведінки
2	Освоєння іншого методу управління ефективністю фотоелектричними перетворювачами	В залежності від методу	Довше, ніж у випадку основної ринкової поведінки
№ п/п	Альтернатива(орієнтовний комплекс заходів)ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації

5.9 Розроблення ринкової стратегії проекту

Ринкова стратегія проекту заснована на визначенні стратегії охоплення ринку, тобто опису цільових груп потенційних клієнтів (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовн ість споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивн ість конкуренції в сегменті	Про стота входу у сегмент
1	Власники приватного домогосподарства	Висока	Середній	Невисока	Середня

Для роботи в обраних сегментах ринку була сформована базова стратегія розвитку (табл. 5.12).

Таблиця 5.12 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Стратегія спеціалізації	Концентрація на потребах одного цільового сегменту	Висока якість послуг. Гнучкість та можливість підтримки невеликих проектів	Стратегія диференціації

5.10 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, підсумуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару в табл. 5.13.

Таблиця 5.13 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Високий ККД	Вищий ККД серед доступних на ринку батарей	Вищий ККД

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій. Запропонована концепція представлена на табл.5.14.

Таблиця 5.14 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для Позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнти на пряму звертаються до компанії	Мережа інтернет, особисті знайомства	Вищий ККД роботи системи серед конкурентів, гарантійне обслуговування	Наголосити на можливому Підвищенні ефективності системи на 30-60%	Найвищий відсоток ефективності роботи сонячної батареї

Висновки до розділу 5

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, можна зазначити, що проект має шанси на успішну ринкову комерціалізацію. Ідея має високу конкурентоспроможність в порівнянні з вже існуючими компаніями.

Проект можливо реалізувати з технічної точки зору, оскільки інструменти для реалізації доступні. До того ж, проект не потребує високих початкових фінансових вкладень.

Ринок на сьогоднішній день є особливо привабливим для входження, оскільки галузь альтернативних джерел енергії, зокрема і сонячна енергетика стрімко розвиваються. Ця сфера отримує великий рівень уваги з боку інвесторів.

Конкуренцію на ринку подібних систем складають лише невеликі локальні компанії. Поява нового продукту, з позитивною «розкачкою» бренду дозволить вирости компанії до національного рівня.

У проекту є широкий вибір альтернатив ринкової поведінки, адже дослідження по підвищенні ефективності систем фотоелектричних перетворювачів ведуться постійно у всіх країнах, які мають відповідні наукові та технічні можливості. Адже, зокрема і за сонячною енергетикою найближче майбутнє енергетичних технологій.

Маркетингова програма включатиме концепцію виходу на ринок, як інноваційної компанії з найвищим коефіцієнтом корисної дії системи фотоелектричних перетворювачів на ринки.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз існуючих методів вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних батарей та порівняння їх з методом динамічного вимірювання ВАХ ФЕСБ.

Побудовано математичну модель методу лінійного розгорнення струму у часі та обґрунтовано вибір транзистора і генератора прямокутних імпульсів для даної схеми.

Вдосконалено моделі сонячних елементів і батарей за рахунок застосування еквівалентної схеми, в якій враховано наявність прихованих дефектів у ФЕСБ.

Розроблено вдосконалену еквівалентну схему сонячного елементу за наявності прихованих дефектів.

Вдосконалено схему лінійного розгорнення струму - за допомогою паралельного (каскадного) підключення транзисторів MOSFET. Це забезпечило вимірювання ВАХ потужних ФЕСБ та їх масивів.

Побудовано фізико-математичну модель двокаскадної схеми, яка описує процеси які відбуваються в схемі під час вимірювання.

Проведено експерименти із зняття вольт-амперних характеристик сонячних батарей за допомогою динамічного методу вимірювання.

Проведено аналіз отриманих осцилограм їх та визначення експлуатаційних параметрів сонячних батарей.

Розраховано похибки вимірювання ВАХ.

За результатами дослідження розроблено стартап-проект.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мхитарян Н.М. Проблемы развития энергетики Украины. Возобновляемая и нетрадиционная энергетика [Текст] /Н.М. Мхитарян, В.Ф. Мачулин // Наука та інновації. —2006. — Т. 2, № 2. — С.63–75.
2. Наумов А.В. Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006–2010 гг. [Текст] /А.В. Наумов //Технология конструирования электронной аппаратуре. — 2006. — № 4. — С.3–8.
3. Wurfel P. Physics of Solar Cells. From Principles to New Concepts [Текст]
4. /P. Wurfel. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag. – 2005. — 186 p.
5. Renewables 2014. Global Status report [Текст]. – Paris. – 2014. – 264p.
6. //Наука та інновації. — 2005. — Т. 1, № 6. — С. 69–79.
7. Solar energy. Technology assessment report. An Assessment of Solar Energy Conversion, Technologies and Research [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Access mode: [http://gcep.stanford.edu/research/technology assessment.html](http://gcep.stanford.edu/research/technology%20assessment.html).
8. Green M.Y. Solar Cell Efficiency Tables (Version 46) [Текст] /М. Green, К. Emery, Y. Hishikawa and others //Progress in Photovoltaic: Res. Appl. — 2015. — V. 23. — P.805–812.
9. Photovoltaics Report – 2015 [Електронний ресурс]. – Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. – Access mode: <http://www.ise.fraunhofer.de>
10. Патон Б.Є. Умови ефективного застосування сонячних електроенергетичних систем [Текст] / Б.Є. Патон, М.І. Ключ, О.Є.
11. Коротинський, А.В Макаров //Вісник НАН України. – 2012. – № 3. – С. 48-58.
12. Горбань А.П. Вплив концентрації надлишкових носіїв заряду на ефективну швидкість поверхневої рекомбінації в кремнієвих фоточутливих структурах [Текст] /А.П. Горбань, В.П. Костильов, А.В. Саченко та ін. // Укрїнський фізичний журнал – 2006. – Т.51, №6. – С. 599 –605.
13. Bobrenko Yu.N. Thin-film solar converters based on the p-Cu_{1.8}S/n-CdTe surface-barrier structure. Semiconductor Physics [Текст] / Yu.N. Bobrenko, S.Yu. Pavelets, T.V. Semikina and others //Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2015. – V. 18, № 1. – P.101-105.
14. Semikina T.V. ZnO as a conductive layer prepared by ALD for solar cells based on n-CdS/n-CdTe/p-Cu_{1.8}S heterostructure [Текст] / T.V. Semikina,

15. S.V. Mamykin and others //Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, №2. – 2013. – P. 111-116.
16. Dmitruk N.L. Au/GaAs photovoltaic structures with single-wall carbon nanotubes on the microrelief interface [Текст] / N.L. Dmitruk, O.Yu. Borkovskaya, S.V. Mamykin and others // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2015. – V. 18, №1. – P. 31 –35.
17. Jiang Chun-Sheng Carrier separation and transport in perovskite solar cells studied by nanometre-scale profiling of electrical potential. [Электронныйресурс] / Chun-Sheng Jiang, Mengjin Yang, Yuanyuan Zhou andothers
18. //Nature Communications, Published 28 Sep. 2015. – Access mode: www.nature.com/naturecommunications.
19. Green M. A. . Solar cell efficiency tables (version 38). [Текст] / M. A.Green,
20. K. Emery, Y. Hishikawa and others //Progress in Photovoltaics: Research and Applications, № 19. – 2011. – P. 565 – 572.
21. Li G. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self- organization of polymer blends [Текст] /G. Li , V. Shrotriya , J. Huang, Y. Yao and others // Nature Materials, 4(11). – 2005. – P.864–868.
22. Levi D.H. Back Contact Effects on Junction Photoluminescence in CdTe/CdS Solar Cells [Текст] / D.H. Levi, L.M. Woods, D.S. Albin and others //26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – September 29 - October 3,1997.
23. Anaheim, California. – 1997. – P.1-5.
24. Breitenstein O. Shunts due to laser scribing of solar cells evaluated by highly sensitive lock-in thermography [Текст] /O. Breitenstein , M. Langenkamp , O. Lang,A.Schirrmacher//SolarEnergyMaterialsandSolarCells.–2001.–
25. №65. – P. 55 – 62.
26. Breitenstein O. Lock-in thermography investigation of shunts in screen-printed and PERL solar cells [Текст] /O. Breitenstein, J.P. Rakotoniaina, S. Neve and others //Proceedings of the 29th IEEE PVSC. New Orleans. –2002. P. 430–433.
27. Breitenstein O. Quantitative imaging of physical parameters of breakdown sites and avalanche multiplication in solar cells by lock-in thermography [Текст] / O. Breitenstein, J. Bauer , J-M. Wagner //Proc. QIRT10, Quebec. – 2010. – P. 213 –217.

28. Breitenstein O. Nondestructive local analysis of current-voltage characteristics of solar cells by lock-in thermography [Текст] /O. Breitenstein //Solar Energy Materials & Solar Cells. №95. – 2011. – №95. – P. 2933 –2936.
29. [Breitenstein O.](#) An emperical method for imaging the short circuit current density in silicon solar cells based on dark lock-in thermography [Текст] /O. Breitenstein, F. Fertig, J. [Bauer](#) // Solar energy materials and solar cells.– 2015. – № 143. – P. 406 –410.
30. [Arredondo B.](#) Impedance spectroscopy analysis of small molecule solution processedorganicsolarcell[Текст]/B.Arredondo,B.Romero,G.Pozoandothers. // Solar energy materials and solar cells, №128. – 2014. – P.351 – 356.
31. [Würfel U.](#) Charge carrier separation in solar cells [Текст] /U.Würfel, A. Cuevas , P. Würfel //IEEE Journal of Photovoltaics. – 2015. – №1.– P.461 – 469.
32. [Bai S.](#) Ethanedithiol treatment of solution-processed ZnO thin films: Controlling the intragap states of electron transporting interlayers for efficient and stable inverted organic photovoltaics [Текст] /S. Bai, Y. Jin, X. Liang and others //Advanced energy materials.. – 2015. – №5. – P.181 –190.
33. [Giesecke J.](#) Harmonically modulated luminescence: Bridging gaps in carrier lifetime metrology across the PV processing chain [Текст] /J. Giesecke, M.C. Schubert,F.Schindler,W.Warta//IEEEJournalofPhotovoltaics.–2015.– №1. – P. 313 – 319.
34. Isenberg J. Imaging method for laterally resolved measurement of minority carrier densities and lifetimes: Measurement principle and first applications [Текст] /J. Isenberg, J. Riepe , S.W. Glunz ,W. Warta //Journal of Applied Physics.– 2003. – №97(7). – P. 4268 –4275.
35. Pysch D. A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells [Текст] /D. Pysch, A. Mette, S.W. Glunz //Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2007. – №91. –P.1698-1706.
36. Rein S. Lifetime spectroscopy for defect characterization: Systematic analysis of the possibilities and restrictions [Текст] /S. Rein, T. Rehrl, W. Warta, S.W. Glunz // Journal of Applied Physics. – 2002. – №91(4). – P.2059–2070.
37. Xing-Fei He. Uniquely Challenging [Текст] /He Xing-Fei // Vision Systems Design. – 2010. – №2. – P. 14 –17.
38. SimonM.Detectionandanalysisofhot-spotformationinsolarcells[Текст]

40. /M. Simon, E.L. Meyer // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2010. – № 94. – P. 106–113.
41. Schmidt J. Light-induced Degradation in Crystalline Silicon Solar Cells [Текст] /J. Schmidt //Solid State Phenomena.– 2004. – Vols. 95–96. – P.187 – 196.
42. Cueto del J.A. Analysis of Leakage Currents in Photovoltaic Modules under High-Voltage Bias in the Field [Текст] /J.A. del Cueto, T.J. McMahon // Progress in Photovoltaics Research & Applications. – 2002. – №10 (1). – P.15–28.
43. Fraunhofer ISE. Jahresbericht 2014/15 [Текст] . – Freiburg: FraunhoferPubl. 2015. – 156 p.
44. Luque A. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering [Текст] /A. Luque, S. Hegedus . – New York.: Wiley. – 2003. – 1180p.
45. Архипов С.А. Современное аппаратное обеспечение для исследования солнечных элементов [Текст] /С.А. Архипов, Н.Н. Боярко //Науковий вісник КУЕІТУ. Нові технології, № 1 (31). – 2011. – С. 25 –30.
46. Breitenstein O. Lock-in Thermography – Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials [Текст] /O. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp. – Berlin: Springer. – 2010. – 256p.
47. Breitenstein O. Series Resistance Imaging in Solar Cells by Lock-in Thermography [Текст] /O. Breitenstein, J.P. Rakotoniaina, A.S.H. van der Heide, J. Carstensen //Prog. Photovolt: Res. Appl. – 2005. – №13. – P. 645 – 660.
48. Haunschild J. Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence [Текст] /J. Haunschild, M. Glatthaar, M. Kasemann and others // Phys. Stat. Sol. RRL. – 2009. – № 3. – P. 227 –229.
49. Breitenstein O. Quantitative evaluation of electroluminescence images of solar cells [Текст] /O. Breitenstein, A. Khanna, Y. Augarten and others
50. //Phys. Stat. Sol. RRL. – 2010. – № 4. – P. 7 – 9.
51. Борисов О.В. Твердотільна електроніка [Текст]
52. / О.В. Борисов , Ю.І. Якименко. – Київ.: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»». – 2015. – 484 с.
53. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов [Текст]
54. /Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. 576 с.

55. Шарупич Л. С. Оптоэлектроника [Текст] /Л. С. Шарупич, Н. М. Тугов. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 256с.
56. Лигачев В. А. Спектральная чувствительность и вольт-амперная характеристика солнечного элемента [Текст] /В.А. Лигачев, А. И.Попов.
57. М: Издательство МЭИ. – 1999. – 13с.
58. Schneider K. World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency [Текст] /К. Schneider. – Fraunhofer ISE. Press Release. Freiburg. – 2013. – № 22/13. – 6р.
59. ГОСТ Р МЭК 60904-3-2013. Приборы фотоэлектрические – Часть 3: Принципы измерения фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения. – [Чинний від 2015 – 01 – 01]. – М.: Стандартиформ. – 2014. –80с.
60. IEC 60904-3 (Ed. 2). Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. – [Чиннийвід 2009 – 01 – 01]. – 2008. – 84р.
61. Brandhorst, H.M. Terrestrial solar cell calibration and measurement procedures [Текст] /H.M. Brandhorst //Proceedings of the Inter. Photovoltaic Solar Energy Conf., Luxemburg, 26-29 May 1977. – Dordrecht-Boston: Reidel Publ. Co. – 1978. – P.745–753.
62. Gueymard C.A. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing [Текст] /C.A. Gueymard //Solar Energy. – 2002. – Vol. 73. – P.443–467.IEC 60904-3. Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. – [Чиннийвід 1990 – 01 – 01]. – 1989. – 84р.
63. Божко К.М. Перехід до нового стандарту сонячної енергетичної світимості у вимірюваннях характеристик сонячних батарей[Текст]
64. /К.М. Божко, А.Д. Женілова //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 10): Всеукраїнська наукова конф. 22-23 грудня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С.33–35.
65. Фреїк Д.М. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку.[Текст] /Д.М. Фреїк, В.М.Чобанюк,М.О.Галушактаін.//Фізикаіхіміятвердоготіла.–2012. Т. 13, № 1. – С. 7-20.

66. Rugescu R. (ed.). Solar Energy [Текст] / R. Rugescu (ed.). – :InTech. –2010. 432 p.
67. Green M.A. Crystalline and thin film silicon solar cells: state of the art and future potential [Текст] /M.A. Green //Solar Energy. – 2003. – №74. – P.181-198.
68. Dovbnya A.N. Procedure of nanodimensional amorphous-microcrystalline structure formation by radiation in single crystal silicon [Текст] /A.N. Dovbnya , V.P. Yefimov, A.S. Abyzov and others //Problems of Atomic Science and Technology. – 2009. – №5. –P.67-745.
69. Nsakalagos L. Silicon nanowire solar cells [Текст /L. Nsakalagos, J. Balch, J. Fronheiser and others //Appl.Phys. Lett.– 2007. – № 91. – P.233117 –233119.
70. Kosjachenko A. Solar Cells – Thin-Film Technologies [Текст] /A. Kosjachenko A. – :InTech. – 2011. – 456p.
71. Soria-Moya A. Performance analysis of models for calculating the maximum power of high concentrator photovoltaic modules [Текст]/A.Soria-Moya,
72. F.A. Cruz, E.F. Fernandez and others //IEEE Journal of Photovoltaics. – 2015. №5(3). – P.947–955.
73. Perez-Higuerasa P. High concentrator photovoltaics efficiencies: Present statusandforecast[Текст]/P.Perez-Higuerasa,E.Munoz,G.Almonacida,P.
74. G. Vidala //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – №15(4). – P.1810–1815.
75. GlunzS.CrystallineSiliconSolarCells[Текст]/S.Glunz.–Freiburg.
76. :Fraunhofer-ISE. – 2014. – 46p.
77. Philipps S.P. Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology [Текст] /Dr. Simon P. Philipps, Dr. Andreas W. Bet. – Freiburg.: Fraunhofer- ISE. – 2015. – 25p.
78. Гременок В.Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов [Текст] /В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов , В.Б. Залесский. – Минск.:Изд. дом БГУ. – 2007. – 224с.
79. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов [Текст] /М.М. Колтун. – М.: Наука. – 1984. – 280с.
80. Фаренбрух А. Солнечные элементы: теория и эксперимент[Текст]
81. /А.Фаренбрух, Р.Бьюб; пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 280 с.

82. Мосс Т. Полупроводниковая оптоэлектроника [Текст] /Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис; пер. с англ. под ред. С.А. Медведева. – М.: Мир. – 1976. – 431с.
83. Мартынов В.Н. Полупроводниковая оптоэлектроника [Текст] /В.Н. Мартынов, Г.И. Кольцов. – М.: Изд. МИСИС. – 1999. – 400с.
84. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т.2 [Текст] /С. Зи; перевод с английского под редакцией Р.А. Сурица. – М.: Мир. – 1984. – Т. 2. – 456с.
85. Placko D. (ed.). Fundamentals of Instrumentation and Measurement [Текст]/
86. D. Placko, ed. – London: ISTE Ltd. – 2007. – 532 p.
87. Scott J. Pulsed device measurements and applications[Текст]
88. /J.Scott, J.Rathmell, A.Parker, M. Sayed //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 44. – 1996. – №12. – P. 2718 – 2723.
89. Baylis C. Performing and analyzing pulsed current-voltage measurements [Текст] /C. Baylis, L. Dunleavy // High Frequency Electronics. – 2004. – Vol. 3, №5. – P. 64 –69.
90. Hulbert P. Dual channel pulse testing simplifies RF transistor characterization [Текст] /P. Hulbert. – :Keithley whitepaper. – 2008. – Vol. 9. – P.1 –5.
91. Parker A. Determining timing for isothermal pulsed-bias S-parameter measurements [Текст] /A. Parker, J. Scott, J. Rathmell, M. Sayed //IEEE MTT-S International Symposium Digest. – San Francisco. –1996. – P. 1707 1710.
92. Keithley Instruments. Pulsed Characterization of Charge-Trapping Behavior in High k Gate Dielectrics [Электронный ресурс]. – Access mode: <http://www.keithley.com/data?asset=50323>
93. Keithley Instruments. Wafer Level Reliability Systems [Электронный ресурс]. – Access mode: <http://www.keithley.com/data?asset=52574>
94. Rathmell J. Characterizing charge trapping in microwave transistors [Текст] / J.Rathmell, A. Parker //SPIE Proceedings. Vol. 6035: Microelectronics: Design, Technology, and Packaging II. – 2006. – P. 1 –9.
95. Ермоленко Е.А. Классификация методов измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов [Текст] /Е.А.Ермоленко
96. //ТКЭА. – 2014. – №2-3. – С. 3 – 11.

97. International Rectifier. Application Note AN-957. Measuring HEXFET and MOSFET Characteristics [Електроннийресурс]. – Access mode: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-957.pdf>.
98. Снятие прямой и обратной вольтамперной характеристики диода при помощи источника-измерителя KEITHLEY 2400 [Ред. Афонський О.О.] // КИПиС. – 2014. – №2. – С.23 –26.
99. IV and CV Characterizations of Solar/Photovoltaic Cells Using the B1500A [Текст] //Agilent, Application Note B1500A-14. – 2009. – 15p.
100. Patent US2896168 A. Transistor characteristic curve tracers / D.E. Thomas; заявникіпатентовласник: [Bell Telephone Labor Inc.](#) – №G01R31/26; заявл. 18.03.1954; оприл.21.07.1959.
101. Hulbert P. Dual channel pulse testing simplifies RFtransistor characterization [Текст] / P. Hulbert // Keithley whitepaper. – 2008.– Vol.9. – P. 1 –5.
102. Кудреватых Е.Ф. Виртуальный измеритель вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов АСС-4211 [Текст] / Е.Ф. Кудреватых // КИПиС. – 2002. – №1. – С.17-19.
103. Patent US20040239346 A1. Method of determining current-voltage characteristics of a device /Natarajan Mahadeva, Steven Thijs, Vesselin K. Vassilev and others.; заявникіпатентовласник: Natarajan Mahadeva, Steven Thijs, Vesselin K. Vassilev and others.; – US 10/817764; заявл. 02.04.2004; оприл.02.12.2004.
104. Patent US 4782290 A. Apparatus for measuring characteristics of electronic devices /Ryoichi Sakai, Hisashi Tamamura; заявникіпатентовласник: Sony/Tektronix, Inc.; – US 07/074910; заявл. 17.07.1987; оприл. 01.11.1988.
105. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы [Текст] /Н.М. Тугов , Б.А. Глебов, Н.А. Чариков . – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 576с.
106. Глуховський В.Ю. Особливості створення систем оцінки геометричних параметрів методом тепловізійного контролю [Текст] /В.Ю. Глуховський, В.О. Троїцький //Методи та прилади контролю якості. – 2014. – №2 (33). – С.3 –9.
107. Ibrahim A. Dark Current -Voltage Characteristics and Lock-in Thermography Techniques as Diagnostic Tools for Monocrystalline Silicon Solar Cells [Текст] /Ali Ibrahim //International Journal Of Renewable Energy Research, IJREP – 2011. – Vol.1, №3. – P.60 –65.

108. Konovalov I.E. Local current-voltage curves measured thermally (LIVT): A new technique of characterizing PV cells [Текст] / Igor E. Konovalov, Otwin Breitenstein, Kornelius Iwig //Solar Energy Materials and Solar Cells. –1997. № 48. – P.53 – 60.
109. Госсорг Ж. Инфракрасная термография [Текст] /Ж. Госсорг // М.:Мир. 1988. – 416 с.
110. Порев В.А., Маркін М.О. Мультиспектральні телевізійні прилади контролю високотемпературних технологій [Текст] /В.А. Порев, О.М. Маркін //Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006.– №4/2 (22). – С. 34 – 39.
112. Пайпер В. Электролюминесценция [Текст] /В.Пайпер, Ф.Вильямс
113. //УФН. – 1960. – т. 70, вып. 4 – С. 622 – 627.
114. Фок М.В. Введение в кинетику люминесценции кристаллофосфоров [Текст] /М.В. Фок. – М.: Наука. – 1964. – 284с.
115. Верещагин И.К. Электролюминесценция кристаллов [Текст] /И.К. Верещагин. – М.: Наука. – 1974. – 280с.
116. Тельный А.А. Имитация солнечного излучения в лабораторных условиях [Текст] /А.А. Тельный //Оптико-механическая промышленность. – 1975. – №5. – С.43 –47.
117. Дубиновский А.М. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов [Текст] /А.М. Дубиновский, Э.Д. Панков. – Л.: Машиностроение. – 1986. –152с.
118. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики [Текст] /Ж. И. Алфёров , В. М. Андреев, В.Д.Румянцев
119. //Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, №8. – С. 937 – 948.
120. Ramos Hernanz J.A. Modelling of Photovoltaic Module [Текст] /J. A. Ramos Hernanz, J. J. Campayo Martín, I. Zamora Belver //International Conference on Renewable Energies and Power Quality. – Granada (Spain), 2010. – P. 487 –490.
121. Härkönen, J. Processing of high efficiency silicon solar cells [Текст] / Jaakko Härkönen. – :Helsinki University of Technology Reports in Electron Physics. – Espoo. – 2001. – 115p.

122. Keithley's Guide to Understanding Electrical Test and Measurement [Текст]. – :Keithley Inc. Publ. – 2012. – 18p.
123. Мисюк Ю.П. Тепловізори як сучасні інтегровані технічні засоби охорони державного кордону [Текст] /Ю.П. Мисюк //Світлотехніка та електроенергетика. №3. – 2011. – №3. – С. 43 –49.
124. Колючкин В.Я. Тепловизионные приборы и системы: учеб. пособие [Текст] /В.Я. Колючкин, Г.М. Мосягин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2002. – 60с.
125. Боженко В.І, Шклярський В.І. Тепловізійні системи як засіб дослідження теплових об'єктів [Текст] /В.І Боженко, В.І. Шклярський. – Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. – 2008. – Р.45 55.
126. Аль-Мзирави А. М. Анализ возможности применения в медицинской диагностике матричных тепловизоров, работающих в спектральных диапазонах 3-5 и 8-12 мкм [Текст] /А. М. Аль-Мзирави, Колобродов В. Г.,Котовский В.И.//Вісник НТУУ —КПІІ.Серія: Приладобудування.– 2013. – Вип. 46. – С. 134 –140.
127. Electrical Characterization of Photovoltaic Materials and Solar Cells with the Model 4200-SCS Semiconductor Characterization System[Текст]. –
128. :Keithley Inc. – App.Note 3026. – 2012. – 100 p.
129. 3708 Programmable Curve Tracer. User Manual [Текст]. – :Tektronix Inc. Publ. – 1990. – 238p.
130. PulsedI-VTestingforComponentsandSemiconductorDevices[Текст].–
131. :Keithley Inc.– 2014. – 74 p.
132. Божко К.М. Імпульсне вимірювання вольт-амперної характеристики фотоелектричної сонячної батареї[Текст]/К.М.Божко,А.Д.Женілова
133. //Приладобудування: стан і перспективи: 14-а Міжнародна науково-технічна конф. 22-23 квітня 2015 р.: тези доп. – Київ. – 2015. – С.142-143.
134. Божко К.М. Імпульсне вимірювання вольт-амперної характеристики сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 4): Всеукраїнська наукова конф. 25-26квітня2014р.:тезидоп.–Тернопіль. 2014. – С. 101-102.
135. Божко К.М. Модель R,L,C перехідного процесу в колі імпульсного вимірювача характеристик фотоелектричних сонячних батарей[Текст]

136. /К.М. Божко, Т.О. Рудик, Г.С. Гуренок // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 12): Всеукраїнська наукова конф. 22-23 квітня 2015 р.: тези доп. – Тернопіль. 2015. – С. 106-107.
137. Божко К. Применение метода аналитического описания кусочно-аналитических зависимостей [Текст] /К. Божко, А. Сильвестров, А. Скрынник // Bulgarian Journal for Engineering Design. – 2014. – Issue №23. P. 33-39.
138. Льюнг Л. Идентификация систем [Текст] /Л. Льюнг – пер с англ. под ред. Я.З. Цыпкина // – М.: Наука. – 1991. – 432с.
139. Пухов Г.Е. Модели технологических процессов [Текст] /Г.Е. Пухов, Ц.С. Хатиашвили // К.: Техніка. – 1974. – 200с.
140. Корн Г. Справочник по математике [Текст] /Г. Корн, Т. Корн // М.: Наука. – 1974. – 831с.
141. Сильвестров А.М. Побудова математичних моделей складних нелінійних залежностей «вхід-вихід» об'єктів автоматизації [Текст]
142. /А.М. Сильвестров, Л.Ю. Спінул, О.М. Скрынник // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. "Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація". – 2012. – Випуск 25 (II). С. 14 – 17.
143. Божко К.М. Инфракрасная термография солнечных элементов, нагретых темновым током [Текст] /К.М. Божко, В.І. Дунаєвський, В.Й. Котовський, В.П. Маслов, В.А. Порев // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 56 – 63.
144. Порев В.А. Термографический контроль солнечных элементов и батарей в режиме стабилизации нагрева темновым током [Текст] /В.А. Порев, В.И. Дунаевский, К.М. Божко // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Москва. – 2014. – №2. – С. 57 – 61.
145. Божко К.М. Термографічний метод дослідження сонячних елементів при їх нагріванні темновим струмом [Текст] /К.М. Божко, І.В. Морозова
146. // Сучасна наука – інструмент динамічного розвитку економіки України: Всеукраїнська наукова конф. 20-21 травня 2013 р. (вип. 21): тези доп. – Тернопіль. – 2013. – С. 88 – 89.

147. Божко К.М. Застосування еквівалентних схем в методах інфрачервоної термографії сонячних елементів [Текст] /К.М. Божко, І.В. Морозова, Н.А. Федченко // Економічна кібернетика – інженерія економіки (вип.. 22): Всеукраїнська наукова конф. 27-28 вересня 2013 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2013. – С. 5 –6.

148. Божко К.М. Нагрівання сонячної батареї змінним струмом при її термографічному контролі [Текст] /К.М. Божко //Приладобудування: стан і перспективи: 13-а Міжнародна науково-технічна конф. 23-24 квітня 2014 р.: тези доп. – Київ. – 2014. – С. 127 –128.

149. Патент України на корисну модель № 88447. Спосіб контролю дефектів у сонячних батареях /Божко К.М., Маслов В.П., Порєв В.А., Качур Н.В., Мотрич І.С.; заявл. 18.11.2013, оприл. 11.03.2014, Бюл. №5.

150. Патент України на корисну модель №92797. Спосіб контролю дефектів в сонячних батареях /Божко К.М.; заявл. 04.02.2014, оприл. 10.09.2014, Бюл. №17.

151. Порєв В.А. Исследование люминесцирующих дефектов солнечных панелей [Текст] /В.А. Порєв, Р.И. Пахалюк, К.М. Божко //Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. –2014. –№1. – С.11-14.

152. Пахалюк Р.І. Візуалізація дефектів кремнієвих фотоелектричних сонячнихбатареї[Текст]/Р.І.Пахалюк,К.М.Божко//ВісникНТУ—ХПІІІ. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси – 2014. – Вип. 40. – С. 3 –7.

153. Порєв В.А. Застосування сплайн-функцій для збільшення швидкості контролю динамічних параметрів зонної плавки [Текст] /В.А. Порєв, Ю.А. Агінський, К.М. Божко //Вісник НТУУ «КПІ». Секція: Приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 58 –63.

154. Порєв В.А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів [Текст] /В.А.Порєв, Г.В.Порєв //Наукові вісті НТУУ —КПІІІ.– 2001. –

№1. – С.56 – 61.

156. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов [Текст] /М.М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983.— 696с.

157. Олберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения [Текст] /Дж. Олберг, Е. Нильсен, Дж. Уолш. – М.:Мир. – 1972.- 316с.

158. Денисюк. В.П. Сплайны и их приложения в задачах моделирования и обработки сигналов [Текст] /В.П. Денисюк, Б.Г. Марченко. – К.:Техніка. 246 с.
159. Божко К.М. Імітатор сонця для потужних сонячних батарей[Текст]
160. /К.М. Божко //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 3): Всеукраїнська наукова конф. 30- 31 березня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С. 46 –47.
161. Bozhko K. Thermographic modeling of pollution of reservoirs with solutions NaCl [Текст] /К. Bozhko, V. Maslov, V. Porev and others. //American Journal of Environmental Protection.– 2014. – Vol. 3, №5. – P. 263 –266.
162. Божко К.М. Лабораторний стенд для дослідження сонячних елементів [Текст] / К.М. Божко //Приладобудування: стан і перспективи: 12-а Міжнародна науково-технічна конф. 23-24 квітня 2013 р.: тези доп. – Київ. – 2013. – С. 137 –138.
163. Божко К.М. Телевізійні та осцилографічні засоби вимірювання в дослідженні сонячних елементів [Текст] /К.М. Божко, О.В.Суліма
164. //Наукові дослідження: шлях від теоретичного пошуку до практичної реалізації: Всеукраїнська наукова конф. 28-29 березня 2013 р. (вип.. 19): тези доп. – Тернопіль. – 2013. – С. 78 – 79.
165. Божко К.М. Стенд для телевізійних досліджень дефектів сонячних батарей [Текст] / К.М. Божко, Т.О. Рудик, Н.А. Федченко //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип.1): Всеукраїнська наукова конф. 30-31 січня 2014 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С. 68 –69.
166. Патент України на корисну модель №96676. Телевізійний спосіб контролю дефектів у сонячних батареях /Божко К.М., Пахалюк Р.І., Порєв В.А., Маслов В.П., Качур Н.В.; заявл. 15.09.2014, оприл. 10.02.2015,Бюл.№3.
167. Божко К.М. Застосування телевізійного мікроскопу для дослідження клейових з'єднань оптико-електронних вузлів сонячних панелей[Тест]
168. /К.М. Божко, Р.І. Пахалюк, Т.О. Рудик //Актуальні проблеми економіки України: науковий підхід до їх вирішення: Всеукраїнська наукова конф. 27-28 лютого 2013 р. (вип. 18): тези доп. – Тернопіль. – 2013. – С. 61 – 62.
169. Божко К.М. Пікова потужність як інтегральний параметр для порівняльного аналізу елементів сонячних панелей [Текст] /К.М. Божко, Т.О.Рудик//Інтердисциплінарні дослідження вгалузях інформаційних технологій,

економіки, математики і техніки: 15-а Всеукраїнська конф., 29-30 жовтня 2012 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2012. – С. 51 – 52.

170. Божко К.М. Темновий струм сонячних елементів у їх порівняльному аналізі [Текст] /К.М. Божко //Наукові дослідження – інструмент вирішення актуальних проблем економіки: 16-а Всеукраїнська наукова конф. 28-29 листопада 2012 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2012. – С.101 – 103.

171. Lynn K. Test Method for Photovoltaic Module Ratings. [Текст] /К. Lynn.–

172. :A Research Institute of the University of Central Florida. – 2001. – 16 p.

173. IEC904-1.MeasurementPrinciplesofPVCurent-VoltageCharacteristics.

– [Чинний від 1988 – 01 – 01]. – 1987. – 6 p.

174. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений [Текст] /К.Г. Рего . – К.: Техніка. – 1987. – 128с.

175. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. – 1990. – 288с.

176. Краус М. Измерительные мнформационные системы [Текст] /М. Краус, Э. Вошни – М.:Мир. – 1975. – 312с.

177. Вошни Э. Динамика измерительных цепей [Текст] /Э. Вошни. – М. Энергия. – 1969. – 212с.

178. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники [Текст] /П.П. Орнатский. – К.: Вища школа. – 1982. – 450с.

179. Дорожовець М.М. Опрацювання результатів вимірювань.[Текст] / М.М. Дорожовець. – Львів: Вид-во нац.. ун-ту «Львівська політехніка». –2007. 624 с.

180. IRF1010N. Data sheet [Електроннийресурс]. – Access mode: <http://www.irf.com/package/irf1010n>

181. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов[Текст] /Р.Кобболд . – Л.: «Энергия».– 1975. – 304 с.

182. Fairchild Semiconductor. AN9010. MOSFET Basics. [Електроннийресурс]. – Access mode: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-9010.pdf>

183. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] /Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа. – 1984. – 559с.

184. Володарський Є.Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю [Текст] /Є.Т. Володарський. – Вінниця: ВДТУ. – 2001. – 219с.

185. Абрамовиц М. (ред.). Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами [Текст] /М. Абрамовиц (ред.). – М.: Наука. – 1979. – 832с.

186. Божко К.М. Графічний розрахунок теплової потужності дефекту типу —hotspot сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко, А.Д. Женилова //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 13): Всеукраїнська наукова конф. 20 – 21 травня 2015 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С.65 – 67.

187. Kreith F. Basic Heat Transfer. [Текст] /F. Kreith, W.Z. Black. – New York.

188. : Harper and Row. – 1980. – 512 p.

189. PHOTOVOLTAICS REPORT. Fraunhofer ISE 2. FHG-SK: ISE-PUBLIC. Freiburg, 25 October 2019. – 48 p. www.ise.fraunhofer.de

190. Загоржевський В.І. Вдосконалення еквівалентних схем фото-електричних сонячних батарей /В.І. Загоржевський, К.М. Божко, А.А. Чор-нуха //Міжн. наук. конф. "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 43)". – Тернопіль, 14 листопада 2019 р. – С. 55-56.

191. Божко К.М. Темнова вольт-фарадна характеристика фото-електричної сонячної батареї / К.М. Божко, В.І. Загоржевський, А.А. Чор-нуха //Міжн. наук. конф. "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 44)". – Тернопіль, 12 грудня 2019 р. – 2 с.

I. M. Dharmadasa. Perovskite solar cells: a deep analysis using current–voltage and capacitance–voltage techniques /I. M. Dharmadasa, Y. Rahaq, A. A. Ojo, T. I. Alanaz. //Journal of Materials Science: Materials in Electronics (2019) Vol. 30. – P. 1227–1235.

192. Fraunhofer ISE annualreport: 2018-2019. Freiburg. – 2019. – 90p. – www.ise.fraunhofer.de